

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“Diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET
para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras
urbanas”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

LOPEZ MEDINA, Alonso Joaquin

ID: 0009-0000-3043-3876

ASESORA

Msc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

ID: 0000-0002-2857-1871

LIMA - PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

LOPEZ MEDINA, Alonso Joaquin

alonso.lopez.m@uni.pe

970757065

Dedicatoria

A mis padres

*Walter Lopez y Esther Medina por su amor y apoyo incondicional, por ser mi fortaleza,
por creer en mi en todo momento y por enseñarme el significado de esfuerzo y
perseverancia.*

A mi asesora

*MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero por ser mi guía y brindarme sus conocimientos y
experiencia para hacer posible esta investigación.*

Agradecimientos

A Dios, por darme salud y fortaleza para superar cada desafío encontrado en este camino.

A mis padres por su apoyo incondicional y sus buenos consejos que me hicieron de mi lo que soy y ser perseverante para cumplir mis metas.

A la asesora MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero por su apoyo y orientación constante y disposición de tiempo los cuales fueron importantes para el desarrollo de esta investigación.

A la universidad por permitirme usar sus instalaciones y todos los conocimientos brindados durante la carrera.

A aquellas personas que intervinieron directa e indirectamente para desarrollar esta investigación.

Tabla de Contenido

	Página
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
Prólogo.....	xi
Lista de Tablas	xii
Lista de Figuras	xviii
Capítulo I: Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos del estudio	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general.....	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Antecedentes investigativos.....	4
1.5.1 Antecedentes nacionales	4
1.5.2 Antecedentes internacionales	5
Capítulo II: Marco teórico y conceptual.....	7
2.1 Pavimento.....	7
2.1.1 Tipos de pavimentos	7
2.1.1.1 Pavimento flexible	7
2.1.1.2 Pavimento semirrígido.....	8
2.1.1.3 Pavimento rígido.....	8
2.2 Mezclas asfálticas	9
2.2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas	9
2.2.1.1 Por la temperatura de puesta en obra	9
2.2.1.2 Por la relación de vacíos en la mezcla asfáltica	9
2.2.1.3 Por el tamaño máximo del agregado	10
2.2.1.4 Por la granulometría	10

2.2.2	Propiedades de las mezclas asfálticas	10
2.2.2.1	Estabilidad	10
2.2.2.2	Flujo	10
2.2.2.3	Porcentaje de vacíos	10
2.2.3	Mezclas asfálticas modificadas	10
2.2.3.1	Técnicas de modificación de mezclas asfálticas	11
2.3	Normativas.....	11
2.3.1	Manual de carreteras, Especificaciones Técnicas generales para construcción EG-2013	11
2.3.1.1	Disposiciones generales	11
2.3.1.2	Pavimento de concreto asfáltico en caliente	12
2.3.2	American Society for Testing and Materials (ASTM) C127 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate / MTC E 206 Peso específico y absorción de agregados gruesos	13
2.3.3	American Society for Testing and Materials (ASTM) C128 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate / MTC E 205 Gravedad específica y absorción de agregados finos	14
2.3.4	Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.....	15
2.3.5	American Society for Testing and Materials (ASTM) D3549/D3549M – 18 Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Asphalt Mixture Specimens / MTC E 507 Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas de pavimento asfáltico.....	17
2.3.6	American Society for Testing and Materials (ASTM) D2041/D2041M-11 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures	17
2.3.7	American Society for Testing and Materials (ASTM) D2726/D2726M-17 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures	18
2.3.8	MS-2 Asphalt Mix Design Methods. Manual Series N°2-7th Edition.....	18
2.3.8.1	Preparación de especímenes de ensayo.....	18
2.4	Diseño de pavimentos	19
2.4.1	Vías colectoras	19
2.4.2	Estudio de tráfico.....	19
2.4.2.1	Volumen Horario de Diseño (VHD)	19
2.4.2.2	Factor direccional (Fd) y factor carril (Fc)	20
2.4.2.3	Tasa de crecimiento vehicular	20
2.4.2.4	Factor vehículo pesado (Fvp).....	21
2.4.2.5	Factor de ajuste por presión de neumático (Fp).....	23
2.4.2.6	Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.....	23

2.4.3	Método de diseño AASHTO 93	24
2.4.3.1	Periodo de diseño	24
2.4.3.2	Número estructural Requerido	24
2.4.3.2.1	Ejes equivalentes (W18)	25
2.4.3.2.2	Módulo Resiliente (M_R)	25
2.4.3.2.3	Confiabilidad (%R)	25
2.4.3.2.4	Coeficiente estadístico de Desviación Estándar Normal (Z_R)	26
2.4.3.2.5	Desviación Estándar Combinada (S_o)	26
2.4.3.2.6	Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)	27
2.4.3.2.7	Número Estructural Propuesto (SNR)	27
2.4.4	Espesor pleno	30
2.4.5	Fallas en el pavimento flexible	30
2.4.5.1	Modelos de fracturamiento por fatiga	30
2.4.5.2	Modelos de deformación permanente	32
Capítulo III: Determinación de la estabilidad de Marshall del diseño de mezcla asfáltica con material PET reciclado		34
3.1	Procedimiento	34
3.1.1	Materiales	34
3.1.2	Muestreo de agregados para ensayos de laboratorio	34
3.1.3	Análisis granulométrico de agregado grueso y fino	38
3.1.4	Determinación de pesos específicos de agregados grueso y fino	42
3.1.5	Selección de agregados grueso y fino para mezcla asfáltica	43
3.1.6	Preparación de los agregados para la mezcla asfáltica	45
3.1.7	Preparación de las mezclas asfálticas y briquetas para especímenes de mezcla asfáltica patrón	48
3.1.8	Medición de briquetas, ensayo de gravedad específica máxima teórica y ensayo de estabilidad y flujo Marshall de especímenes de mezcla asfáltica patrón	50
3.1.9	Preparación de las mezclas asfálticas y briquetas para especímenes de mezcla asfáltica con PET	53
3.1.10	Medición de briquetas, ensayo de gravedad específica máxima teórica y ensayo de estabilidad y flujo Marshall de especímenes de mezcla asfáltica con PET	55
3.2	Resultados	58
3.2.1	Análisis granulométrico	58
3.2.2	Gravedad específica y absorción de agregados	58
3.2.3	Medición de muestras de mezcla asfáltica convencional	59
3.2.4	Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional	61
3.2.5	Gravedad específica máxima teórica (RICE) de mezcla asfáltica convencional	63

3.2.6	Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional	65
3.2.7	Medición de muestras de mezcla asfáltica con incorporación de PET	73
3.2.8	Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con incorporación de PET	75
3.2.9	Gravedad específica máxima teórica (RICE) de mezcla asfáltica con incorporación de PET	77
3.2.10	Diseño Marshall de mezcla con incorporación de PET	78
3.2.11	Estabilidad máxima de mezcla asfáltica con incorporación de PET	85
Capítulo IV: Determinación del flujo Marshall del diseño de mezcla asfáltica con material PET reciclado		87
4.1	Flujo Marshall de mezcla asfáltica con incorporación de PET	87
4.1.1	Resultados de flujo en mm de especímenes con PET ensayados	88
4.1.2	Flujo máximo de mezcla asfáltica con incorporación de PET	90
4.2	Porcentaje de vacíos de mezcla asfáltica con incorporación de PET	91
4.3	Propuesta de mezcla asfáltica modificada y mezcla asfáltica convencional para vías colectoras urbanas	93
4.3.1	Factor vehículo pesado (Fvp).....	94
4.3.2	Conteo vehicular en vía colectora urbana	96
4.3.2.1	VHD en vías colectoras urbanas Av. Central y Av. Revolución	98
4.3.2.2	Repeticiones de ejes equivalentes en el periodo de diseño	98
4.3.3	Diseño de espesores de pavimento flexible	101
4.3.3.1	Método AASHTO 93.....	101
4.3.3.2	Método Instituto del Asfalto (espesor pleno)	106
4.3.4	Análisis de esfuerzos y deformaciones: fallas por fatiga y ahuellamiento ...	107
4.3.4.1	Fatiga y ahuellamiento caso desfavorable.....	108
4.3.4.2	Fatiga y ahuellamiento en Av. Revolución.....	114
4.3.4.3	Fatiga y ahuellamiento en Av. Central	119
4.3.4.4	Espesor de carpeta asfáltica modificada que no falla por fatiga y ahuellamiento en Av. Revolución.....	124
4.3.4.5	Espesor de carpeta asfáltica modificada que no falla por fatiga y ahuellamiento en Av. Central	129
4.3.5	Análisis de Precios Unitarios (APU) de diseño de mezcla asfáltica.....	134
Conclusiones		146
Recomendaciones.....		148
Referencias bibliográficas		150
Anexos		155

Resumen

El objetivo de la presente investigación es diseñar una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras urbanas. Para ello se utilizó el método húmedo para incorporar el PET a la mezcla. Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla convencional, seguidamente se realizaron los ensayos correspondientes para mezcla asfáltica a la mezcla con incorporación de PET para determinar sus propiedades mecánicas y los contenidos de asfalto correspondientes a estos. Asimismo, se realizó una propuesta de carpetas asfálticas con asfalto modificado. Se diseñaron con el método mecanístico de AASHTO 93 y se comparó con los diseños de carpeta asfáltica modificada de otros métodos provenientes del Instituto del Asfalto y Compañía Shell, para optimizar la carpeta asfáltica al tráfico estudiado utilizando el software PITRA PAVE.

Se logró determinar que para un porcentaje de vacíos de 5 % recomendado se tiene un porcentaje en peso del cemento asfáltico de 2.46 % de PET y una estabilidad de 1471.692 kgf lo cual es 100.077 % la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional, el valor del flujo obtenido es 4.245 mm lo cual es 101.799 % del flujo de la mezcla asfáltica convencional y para un 2.46% de PET del cemento asfáltico se obtiene 5 % de porcentaje de vacíos lo cual es 123.977% del valor de la mezcla asfáltica convencional.

Palabras claves - mezcla asfáltica, propiedades mecánicas, PET, Marshall

Abstract

The objective of this research is to design an asphalt mixture incorporating PET to improve its mechanical properties on urban collector roads. To this end, the wet method was used to incorporate PET into the mixture. Laboratory tests were conducted to determine the optimal asphalt cement content of the conventional mixture, followed by corresponding asphalt mixture tests on the mixture incorporating PET to determine its mechanical properties and corresponding asphalt contents. A proposal for modified asphalt pavements was also made. These pavements were designed using the AASHTO 93 mechanistic method and compared with modified asphalt pavement designs from other methods, the Asphalt Institute, and the Shell Company, to optimize the pavement for the traffic studied using PITRA PAVE software.

It was determined that for a recommended 5 % void percentage, the asphalt cement weight percentage is 2,46 % PET and a stability of 1471,692 kgf, which is 100,077 % of the stability of the conventional asphalt mixture. The flow value obtained is 4,245 mm, which is 101,799 % of the flow of the conventional asphalt mixture. For a 2,46 % PET content of asphalt cement, a 5 % void percentage is obtained, which is 123,977% of the value of the conventional asphalt mixture.

Keywords: asphalt mixture, mechanical properties, PET, Marshall

Prólogo

En las últimas décadas la cantidad de desechos plásticos a nivel mundial está en aumento. En el Perú, el polietileno tereftalato (PET), el cual contiene muchos contaminantes químicos, tiene una considerable presencia dentro de los desechos que se generan.

Por ello, investigar la manera de cómo reducir estos desechos de PET en el medio ambiente y reutilizarlos en la ingeniería es muy importante.

La presente investigación está dirigida a aquellos interesados en un método de poder reducir el PET en el ambiente y utilizarlo para producir mezclas asfálticas con un porcentaje de estos. Además, tomar como base esta investigación y mejorarla produciendo nuevas.

En este trabajo se hablará de los antecedentes de la investigación, la problemática, la formulación del problema, los objetivos, las hipótesis, las variables de investigación, sus dimensiones y tipo de metodología, el marco teórico, la metodología de trabajo de desarrollo que se emplea en la investigación, los resultados obtenidos, las conclusiones y recomendaciones.

Lista de Tablas

	Página
Tabla 1. Selección del tipo de cemento asfáltico.....	11
Tabla 2. Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)	12
Tabla 3. Requisitos para mezcla asfáltica en caliente.....	12
Tabla 4. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	13
Tabla 5. Factores de Estabilidad de Correlación.....	16
Tabla 6. Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el Carril de Diseño	20
Tabla 7. Pesos y medidas máximas permitidas	22
Tabla 8. Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalentes (EE)	23
Tabla 9. Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico	25
Tabla 10. Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Z_R) para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según el nivel de confiabilidad seleccionado y el rango de tráfico	26
Tabla 11. Índice de Serviciabilidad Inicial (P_i), Serviciabilidad Final (P_t) y Diferencial de Serviciabilidad (ΔPSI) según rango de tráfico	27
Tabla 12. Coeficientes estructurales de las capas del pavimento a_i	28
Tabla 13. Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje m_i para bases y subbases granulares no tratadas en pavimentos flexibles	28
Tabla 14. Valores recomendados de espesores mínimos de capa superficial y base granular.....	29
Tabla 15. Módulos elásticos (E) típicos en materiales para pavimentación	31
Tabla 16. Relaciones de Poisson (ν) típicas en materiales para pavimentación	32
Tabla 17. Criterios de deformación utilizados por diversas instituciones	33
Tabla 18. Materiales para la mezcla asfáltica y su procedencia	34
Tabla 19. Análisis granulométrico de mezcla de agregados.....	58
Tabla 20. Gravedad específica y absorción de agregado grueso.....	58
Tabla 21. Gravedad específica y absorción de agregado fino	59
Tabla 22. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico	59
Tabla 23. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico	60
Tabla 24. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico	60
Tabla 25. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico	61

Tabla 26. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico	61
Tabla 27. Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico	61
Tabla 28. Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico	62
Tabla 29. Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico	62
Tabla 30. Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico	62
Tabla 31. Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico	63
Tabla 32. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico.....	63
Tabla 33. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico.....	63
Tabla 34. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico.....	64
Tabla 35. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico.....	64
Tabla 36. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico.....	64
Tabla 37. Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 5% de cemento asfáltico	65
Tabla 38. Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 5.5% de cemento asfáltico.....	66
Tabla 39. Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6% de cemento asfáltico	67
Tabla 40. Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6.5% de cemento asfáltico.....	68
Tabla 41. Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6.1% de cemento asfáltico.....	69
Tabla 42. Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional.....	70
Tabla 43. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 2% de PET	73
Tabla 44. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 4% de PET	74
Tabla 45. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6% de PET	74
Tabla 46. Medición de muestras de mezcla asfáltica con 8% de PET	75
Tabla 47. Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET	75
Tabla 48. Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET	76
Tabla 49. Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET	76

Tabla 50. Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET	77
Tabla 51. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 2% de PET	77
Tabla 52. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 4% de PET	77
Tabla 53. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6% de PET	78
Tabla 54. Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 8% de PET	78
Tabla 55. Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET	78
Tabla 56. Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET	79
Tabla 57. Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET	81
Tabla 58. Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET	82
Tabla 59. Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con PET	83
Tabla 60. Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 4.54% de PET	86
Tabla 61. Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 4.54% de PET y mezcla asfáltica convencional.....	87
Tabla 62. Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET	88
Tabla 63. Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET	88
Tabla 64. Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET	88
Tabla 65. Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET	88
Tabla 66. Flujo Marshall de mezcla asfáltica con PET	89
Tabla 67. Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 5.58% de PET	90
Tabla 68. Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 5.58% de PET y mezcla asfáltica convencional.....	91
Tabla 69. Porcentaje de vacíos de mezcla asfáltica con PET	91
Tabla 70. Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 2.46% de PET	92
Tabla 71. Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 2.46% de PET y mezcla asfáltica convencional.....	92
Tabla 72. Cuadro resumen de propiedades mecánicas.....	93
Tabla 73. Factor vehículo pesado (Fvp) utilizado para vía colectora urbana Av. Central y Revolución.....	95
Tabla 74. Conteo vehicular en Av. Revolución con sentido de Norte a Sur	96
Tabla 75. Conteo vehicular en Av. Revolución con sentido de Sur a Norte	96
Tabla 76. Conteo vehicular en Av. Central con sentido de Norte a Sur	97
Tabla 77. <i>Conteo vehicular en Av. Central con sentido de Sur a Norte</i>	97
Tabla 78. VHD de Av. Revolución.....	98

Tabla 79. VHD de Av. Central.....	98
Tabla 80. Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=12%IMD Av. Revolución	99
Tabla 81. Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=18%IMD Av. Revolución	99
Tabla 82. Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=12%IMD Av. Central.....	100
Tabla 83. Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=18%IMD Av. Central.....	100
Tabla 84. Diseño de pavimento flexible para VHD=12%IMD Av. Revolución	102
Tabla 85. Diseño de pavimento flexible para VHD=18%IMD Av. Revolución	103
Tabla 86. Diseño de pavimento flexible para VHD=12%IMD Av. Central.....	104
Tabla 87. Diseño de pavimento flexible para VHD=18%IMD Av. Central.....	105
Tabla 88. Módulos elásticos (E) considerados para análisis en PITRA PAVE.....	107
Tabla 89. Relaciones de Poisson (ν) considerados para análisis en PITRA PAVE.....	108
Tabla 90. Fracturamiento por fatiga con $E=4000\text{Mpa}$ para 12%IMD Av. Revolución	109
Tabla 91. Deformación permanente con $E=4000\text{Mpa}$ para 12%IMD Av. Revolución.....	109
Tabla 92. Fracturamiento por fatiga con $E=4000\text{Mpa}$ para 18%IMD Av. Revolución	110
Tabla 93. Deformación permanente con $E=4000\text{Mpa}$ para 18%IMD Av. Revolución	110
Tabla 94. Fracturamiento por fatiga con $E=4000\text{Mpa}$ para 12%IMD Av. Central.....	111
Tabla 95. Deformación permanente con $E=4000\text{Mpa}$ para 12%IMD Av. Central	111
Tabla 96. Fracturamiento por fatiga con $E=4000\text{Mpa}$ para 18%IMD Av. Central.....	112
Tabla 97. Deformación permanente con $E=4000\text{Mpa}$ para 18%IMD Av. Central	112
<i>Tabla 98. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución.....</i>	<i>114</i>
Tabla 99. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución.....	115
Tabla 100. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	116
Tabla 101. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	117
Tabla 102. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	118
Tabla 103. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	119
Tabla 104. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central.....	120
Tabla 105. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central.....	120

Tabla 106. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central.....	121
Tabla 107. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central.....	122
Tabla 108. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central.....	123
Tabla 109. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central.....	124
Tabla 110. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	125
Tabla 111. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	125
Tabla 112. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	126
Tabla 113. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	126
Tabla 114. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno con e=4cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	128
Tabla 115. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno con e=4cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	129
Tabla 116. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central	130
Tabla 117. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central	130
Tabla 118. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central	131
Tabla 119. Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central	132
Tabla 120. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=8cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central	133
Tabla 121. Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=7cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central	134
Tabla 122. APU de carpeta asfáltica e=11cm obtenido de diseño AASHTO 93 para VHD=12%IMD de Av. Revolución.....	135
Tabla 123. APU de carpeta asfáltica e=30cm obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para VHD=12%IMD de Av. Revolución	135
Tabla 124. APU de carpeta asfáltica modificada e=2.5cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para VHD=12%IMD de Av. Revolución	136

Tabla 125. APU de carpeta asfáltica modificada $e=4\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para $VHD=12\%IMD$ de Av. Revolución	136
Tabla 126. APU de carpeta asfáltica $e=10\text{cm}$ obtenido de diseño AASHTO 93 para $VHD=18\%IMD$ de Av. Revolución.....	137
Tabla 127. APU de carpeta asfáltica $e=27.5\text{cm}$ obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para $VHD=18\%IMD$ de Av. Revolución	137
Tabla 128. APU de carpeta asfáltica modificada $e=2.5\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para $VHD=18\%IMD$ de Av. Revolución	138
Tabla 129. APU de carpeta asfáltica modificada $e=4\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para $VHD=18\%IMD$ de Av. Revolución	138
Tabla 130. APU de carpeta asfáltica $e=14\text{cm}$ obtenido de diseño AASHTO 93 para $VHD=12\%IMD$ de Av. Central	139
Tabla 131. APU de carpeta asfáltica $e=37.5\text{cm}$ obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para $VHD=12\%IMD$ de Av. Central	140
Tabla 132. APU de carpeta asfáltica modificada $e=2.5\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para $VHD=12\%IMD$ de Av. Central.....	140
Tabla 133. APU de carpeta asfáltica modificada $e=8\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para $VHD=12\%IMD$ de Av. Central ..	141
Tabla 134. APU de carpeta asfáltica $e=13\text{cm}$ obtenido de diseño AASHTO 93 para $VHD=18\%IMD$ de Av. Central	141
Tabla 135. APU de carpeta asfáltica $e=32.5\text{cm}$ obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para $VHD=18\%IMD$ de Av. Central	142
Tabla 136. APU de carpeta asfáltica modificada $e=2.5\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para $VHD=18\%IMD$ de Av. Central.....	142
Tabla 137. APU de carpeta asfáltica modificada $e=7\text{cm}$ obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para $VHD=18\%IMD$ de Av. Central ..	143
Tabla 138. Cuadro comparativo de diseño de pavimento de Av. Revolución	144
Tabla 139. Cuadro comparativo de diseño de pavimento de Av. Central.....	144
Tabla 140. Cuadro comparativo de precio por m^2 de mezcla asfáltica de Av. Revolución	145
Tabla 141. Cuadro comparativo de precio por m^2 de mezcla asfáltica de Av. Central ...	145

Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Estructura de un pavimento flexible	8
Figura 2. Estructura de un pavimento rígido.....	8
Figura 3. Carta de diseño para espesor pleno de pavimento asfáltico	30
Figura 4. Muestra de agregado grueso y colocación de muestra de cono en superficie dura y limpia	35
Figura 5. Primer cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia	35
Figura 6. Segundo cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia.....	35
Figura 7. Tercer y último cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia.....	36
Figura 8. Muestra de agregado grueso para análisis granulométrico.....	36
Figura 9. Muestra de agregado grueso, colocación de muestra de cono en superficie dura y limpia y primer cuarteo.	37
Figura 10. Colocación de cuartos opuestos en cono sobre superficie dura y limpia y segundo cuarteo.....	37
Figura 11. Colocación de cuartos opuestos en cono sobre superficie dura y limpia y tercer cuarteo. Se escoge uno de los cuartos como muestra para análisis granulométrico.	37
Figura 12. Colocación de muestra de agregado fino en horno	38
Figura 13. Muestra de agregado grueso y tamices a utilizar	38
Figura 14. Tamizado de agregado grueso por malla ½"	39
Figura 15. Tamizado de agregado grueso por malla 3/8"	39
Figura 16. Tamizado de agregado grueso por malla N°4	39
Figura 17. Tamizado de agregado grueso por malla N°200	40
Figura 18. Muestra de agregado fino para tamizado.....	40
Figura 19. Tamizado de agregado fino por malla N°10.....	40
Figura 20. Tamizado de agregado fino por malla N°40.....	41
Figura 21. Tamizado de agregado fino por malla N°80.....	41
Figura 22. Tamizado de agregado fino por malla N°200.....	41
Figura 23. Cuarteo para obtener muestra de agregado grueso.....	42
Figura 24. Saturado de la muestra de agregado grueso retenido por tamiz N°4 por 24 horas	42

Figura 25. Saturado de la muestra de agregado fino por 24 horas	42
Figura 26. Lavado con tamiz N°200 de la muestra de agregado fino	43
Figura 27. Pesaje del agregado en agua.....	43
Figura 28. Cuarteo para obtener muestra más homogénea	44
Figura 29. Cantidad de agregado grueso que se utilizará en la mezcla	44
Figura 30. Tamizado por las mallas respectivas y obtención de los retenidos.....	44
Figura 31. Cantidad de agregado fino que se utilizará en la mezcla	45
Figura 32. Tamizado por las mallas respectivas y obtención de los retenidos.....	45
Figura 33. Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de 1/2"	46
Figura 34. Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de 3/8"	46
Figura 35. Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de N°4	46
Figura 36. Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de N°10	47
Figura 37. Colocación en tara de agregado pasante de tamiz N°10	47
Figura 38. Colocación de las taras al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	47
Figura 39. Calentamiento de cemento asfáltico PEN 60/70.....	48
Figura 40. Adición de cemento asfáltico PEN 60/70 a la tara de mezcla de agregados	
Adición de cemento asfáltico PEN 60/70 a la tara de mezcla de agregados	48
Figura 41. Mezclado manual de cemento asfáltico y agregados	49
Figura 42. Colocación de mezclas asfálticas sueltas al horno a $145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$	49
Figura 43. Compactación de las mezclas asfálticas.....	49
Figura 44. Briquetas de mezclas asfálticas en moldes	50
Figura 45. Desmoldado de briquetas con gata hidráulica	50
Figura 46. Medición de dimensiones y pesado de briquetas	51
Figura 47. Pesaje de los especímenes superficialmente secos y sumergidos en agua ...	51
Figura 48. Inmersión de briquetas en baño maría a 60°C	51
Figura 49. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional.....	52
Figura 50. Muestra suelta de mezcla asfáltica convencional seca al aire y pesado de esta	
.....	52
Figura 51. Extracción de vacíos con bomba de vacíos a muestra suelta.....	52
Figura 52. Temperado de recipiente con muestra y pesado de estos	53
Figura 53. Adición de plástico PET al cemento asfáltico según método húmedo	53
Figura 54. Mezclado de cemento asfáltico con PET con los agregados y puesta en horno	
.....	54

Figura 55. Compactación de las mezclas asfálticas con martillo de compactación en moldes	54
Figura 56. Desmoldado de briquetas con gato hidráulico	54
Figura 57. Medición de diámetros y alturas de los especímenes con vernier	55
Figura 58. Pesaje de espécimen seco al aire	55
Figura 59. Pesaje de espécimen sumergido en agua y saturado superficialmente	56
Figura 60. Inmersión de especímenes con PET en baño maría a 60°C.....	56
Figura 61. Ensayo con máquina de carga Marshall de especímenes con PET	56
Figura 62. Muestra suelta de mezcla asfáltica seca al aire.....	57
Figura 63. Extracción de vacíos con bomba.....	57
Figura 64. Pesado de recipiente con muestra	57
Figura 65. Gráfica de análisis granulométrico de mezcla de agregados para diseño de mezcla asfáltica MAC – 2.....	58
Figura 66. Porcentaje de vacíos vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional.	71
Figura 67. Volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional.....	71
Figura 68. Volumen de vacíos llenos con asfalto efectivo (VFA) vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional.....	72
Figura 69. Peso específico vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional	72
Figura 70. Estabilidad vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional.....	73
Figura 71. Flujo vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional.....	73
Figura 72. Porcentaje de vacíos vs porcentaje de PET	83
Figura 73. Volumen de vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de PET	84
Figura 74. Volumen de vacíos llenos con asfalto efectivo vs porcentaje de PET	84
Figura 75. Peso específico vs porcentaje de PET	85
Figura 76. Estabilidad vs porcentaje de PET	85
Figura 77. Estabilidad máxima de mezcla asfáltica con incorporación de PET	86
Figura 78. Ensayo de estabilidad y flujo de espécimen con PET	87
Figura 79. Flujo vs porcentaje de PET	89
Figura 80. Flujo máximo de mezcla asfáltica con incorporación de PET	90
Figura 81. Porcentaje de vacíos máximo según EG – 2013 de mezcla asfáltica con incorporación de PET	91
Figura 82. Actividad económica en el segundo trimestre del 2024.....	99
Figura 83. Espesor pleno para Av. Revolución	106

Figura 84. Espesor pleno para Av. Central.....	107
Figura 85. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	114
Figura 86. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	116
Figura 87. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	117
Figura 88. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	118
Figura 89. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central.....	119
Figura 90. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central.....	121
Figura 91. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central.....	122
Figura 92. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central.....	123
Figura 93. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución	124
Figura 94. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución	126
Figura 95. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=4cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución.....	127
Figura 96. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=4cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución.....	128
Figura 97. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central	129
Figura 98. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central	131
Figura 99. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=8cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central	132
Figura 100. Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=7cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central	133

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

La industria de la construcción de carreteras desempeña un papel fundamental en el desarrollo y la conectividad de las sociedades modernas. Sin embargo, este progreso no está exento de desafíos significativos, como el agotamiento de recursos naturales, la creciente conciencia medioambiental y la demanda de soluciones más sostenibles. En este contexto, el uso de materiales reciclados en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente ha surgido como una estrategia prometedora que no solo aborda estos desafíos, sino que también potencia la mejora del rendimiento y la durabilidad de las carreteras. Asimismo, el desarrollo sostenible y la gestión responsable de los recursos naturales son preocupaciones fundamentales en la industria de la construcción de carreteras y pavimentos. En este contexto, la incorporación de materiales reciclados en la producción de mezclas asfálticas en caliente se ha convertido en una estrategia clave para reducir la demanda de recursos naturales y disminuir el impacto ambiental.

1.2 Descripción del problema de investigación

En 2016 se produjo a nivel global 242 millones de toneladas de desechos plásticos, esta cifra viene en aumento y como consecuencia conlleva a generar preocupación en la población debido al impacto que causa al medioambiente y la salud de los seres humanos. Asimismo, un estudio realizado en Europa indicó que las botellas de plástico reciclado contienen 150 químicos, de ellos 18 sobrepasan los límites de seguridad, dichos químicos son más común encontrarlos en las botellas PET (Farias, 2023).

A nivel mundial la producción anual de desechos plásticos alcanza las 1300 toneladas. En el caso de China, el cual es el país que arroja la mayor cantidad de desecho plástico al mar con un total de 269.9 millones de toneladas anuales. En otros países, debido a la alta cantidad de producción de residuos plásticos la gente opta por quemar los desechos; esto provoca sulfuro de hidrógeno en gas el cual contamina el aire. Todos estos desechos plásticos, donde se encuentra el material PET contaminan el medioambiente y perjudica la salud de los seres humanos, las plantas, animales marinos, terrestres y aves (Alvines, 2023).

Se estima que cada año a nivel mundial se produce alrededor de 300 millones de toneladas de plástico. La incorrecta eliminación de estos desechos conlleva a que el nivel

de contaminación del medio ambiente sea alto. Una fracción del total de desechos producidos, alrededor de 8 millones de toneladas se arrojan al mar perjudicando el ecosistema marino (Contreras y Zúñiga, 2020).

En Colombia, de acuerdo con la Guía de Ciclo-Infraestructura Colombiana la producción de las mezclas asfálticas en caliente convencionales contribuyen a la emisión de Gases de Efecto Invernadero, ya que se calculó que con dicha producción de una tonelada de mezcla asfáltica tradicional se emiten 61.87 kg de CO₂ eq/t en comparación con las mezclas asfálticas con material PET se reduce a un 13.5% (Lopez, 2020).

La producción de plásticos, la cual genera contaminación medioambiental y dicho material presenta características las cuales hacen que sea dificultoso su eliminación, como su alta durabilidad a la intemperie, su resistencia a químicos, etc. Por otro lado, los insumos que se necesitan para producir una mezcla asfáltica convencional tienen un costo más elevado y la extracción de las canteras aumenta la polución en el entorno (Bernardo y Mendiguri, 2022).

Los plásticos al ser un material que el ser humano utiliza diariamente la incidencia que tiene en la contaminación del medio ambiente es alta. Por ello se trata de crear nuevas formas de eliminarlos, ya que actualmente es un problema que se tiene tanto para la generación de hoy y las venideras (Hake et al., 2020).

Desde 1950, la producción mundial de plástico ha tenido una tasa de crecimiento anual de 10% alcanzando en 2019 alrededor de 368 millones de toneladas, esto debido a que el plástico es un material de la sociedad moderna con mucha demanda. Además, el reciclaje de plástico en la actualidad es bajo y ciertas partículas de este son tóxicas y dañinas para los seres vivos (Heydari et al., 2021).

1.2.1 Problema general

Un gran problema que tenemos en el Perú y todo el mundo es la contaminación ambiental debido a la producción y desechos plásticos, ya que su reciclaje y reutilización no es muy común. Además, contienen muchos químicos contaminantes, los cuales se encuentran con más facilidad en el material PET. Por otro lado, existe dos maneras de mezclar material PET al betún, seco y húmedo, el primero se mezcla el plástico PET con el agregado de lo cual se obtiene una mezcla asfáltica menos homogénea o uniforme lo cual dificulta el uso del método Marshall; el método húmedo plantea mezclar el plástico PET con el asfalto y obtener una mezcla homogénea lo cual es requisito para utilizar el método Marshall y determinar sus parámetros. Por ello, esta investigación plantea diseñar una mezcla asfáltica añadiéndole un porcentaje de material PET utilizando el método

húmedo para mezclar dicho material con el asfalto y observar el desempeño de las propiedades mecánicas, para contribuir en la reducción de la contaminación ambiental y dicho material se reutilice,

Ante lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite mejorar las propiedades mecánicas en vías colectoras urbanas?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿En qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite mejorar la estabilidad Marshall en vías colectoras urbanas?
- ¿En qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite mejorar el flujo Marshall en vías colectoras urbanas?
- ¿En qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite mejorar el porcentaje de vacíos en vías colectoras urbanas?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras urbanas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular en qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite determinar la estabilidad Marshall en vías colectoras urbanas.
- Calcular en qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite determinar el flujo Marshall en vías colectoras urbanas.
- Calcular en qué medida el diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET permite determinar el porcentaje de vacíos en vías colectoras urbanas.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

El diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET mejorará sus propiedades mecánicas en vías colectoras urbanas.

1.4.2 Hipótesis específicas

- El diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET contribuyen a determinar la estabilidad Marshall en vías colectoras urbanas.
- El diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET contribuyen a determinar el flujo Marshall en vías colectoras urbanas.
- El diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET contribuyen a determinar el porcentaje de vacíos en vías colectoras urbanas.

1.5 Antecedentes investigativos

1.5.1 Antecedentes nacionales

Cavalcanti e Hinostroza (2022) realizaron la investigación cuyo objetivo es desarrollar una mezcla asfáltica con adiciones de PET para disminuir el impacto ambiental ocasionado por los desechos de las botellas plásticas en el distrito de San Juan de Lurigancho. Para el diseño de la mezcla asfáltica se utilizó el Método Marshall y se diseñó una mezcla asfáltica modificada con 0.3% y 0.5% de PET. Se realizó ensayos para determinar el comportamiento de la nueva mezcla asfáltica con adiciones de PET y se comparó las propiedades y características de la mezcla asfáltica con PET con una mezcla asfáltica patrón. Se concluyó que la mezcla asfáltica con menos cantidad de PET presenta mejores resultados en sus propiedades, por otro lado, al usar PET como agregado no presenta mejores resultados debido a que tiene menos adherencia, sin embargo, se puede usar aditivos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

Corbacho (2019) plantea una investigación con el objetivo de optimizar el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente agregando un polímero plastómero por vía seca. Dicho polímero fue el polietileno tereftalato (PET). Esta propuesta de utilizar el material PET, el cual se obtuvo de un centro de reciclaje de botellas, es debido al problema de contaminación medioambiental producidos por los residuos de plásticos. Se utilizó el Método de Marshall para diseñar y obtener el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica convencional, luego se modificó la mezcla agregando fibras PET en reemplazo del agregado fino en vía seca con la finalidad de obtener el contenido óptimo de dichas fibras. Se determinó el contenido óptimo de asfalto en 6.1% y de fibras PET en 1.2%, con ello se realizó el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo para determinar el desempeño ante ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad, asimismo, se realizó otros ensayos para obtener los desempeños en tracción y humedad inducida, rigidez bajo carga cíclica y se analizaron todos los parámetros Marshall. De lo anterior se concluyó que la mezcla asfáltica con fibras PET disminuyó en un 9.6% la estabilidad Marshall, por otro lado, el flujo

aumentó en 6.52%. Además, la resistencia a la susceptibilidad a la deformación permanente aumentó en 24% con respecto de la mezcla asfáltica patrón.

Espinoza (2019) realizó una investigación con la finalidad de mostrar el desempeño de una mezcla asfáltica incorporado con plástico PET fundido considerando la contaminación del medio ambiente y los usos que se puede dar al plástico PET reciclado en las mezclas asfálticas para el mantenimiento de las calles ya que el tiempo de vida del plástico PET es de 500 años. Se diseñó una mezcla asfáltica en caliente convencional y otra mezcla asfáltica con plástico reciclado PET fundido considerando la norma MTC E504 de ensayo Marshall. De la primera mezcla se elaboró 15 briquetas con cemento asfáltico convencional PEN 60/70, por otro lado, se elaboró 45 briquetas de mezcla asfáltica con plástico PET cuyos porcentajes son 18%, 20%, 22%, 24% y 26% en peso. A estas mezclas asfálticas se ensayaron pruebas de estabilidad y fluencia. Se concluyó que la contextura física de la mezcla asfáltica con el plástico PET es más rígido que el convencional, además, la temperatura de mezcla en la mezcla asfáltica con plástico PET fue de 280°C en comparación de los 140°C de la mezcla asfáltica convencional.

1.5.2 Antecedentes internacionales

Hernández (2023) realizó una investigación con la finalidad de reducir los residuos plásticos en El Salvador con el diseño y elaboración de una mezcla asfáltica utilizando material reciclado de PET molido. Se efectuó el ensayo Marshall para obtener los valores de estabilidad y deformabilidad en los pavimentos asfálticos. Previo a ello, se determinó la cantidad de material PET a sustituir en la mezcla asfáltica; se acordó elaborar 4 briquetas con un contenido de 3% y cuatro briquetas con un 5% de PET molido. Se realizó ensayos de laboratorio para determinar la granulometría de los agregados, los pesos específicos, absorción de estos mediante el humedecimiento en un tiempo determinado. De los resultados obtenidos en los ensayos se comparó la mezcla asfáltica convencional con la mezcla asfáltica con PET. De lo anterior se concluyó que la mezcla asfáltica más eficaz para construir calles de tráfico liviano es aquella que contiene un 3% de material PET. Por otro lado, los resultados obtenidos para la mezcla asfáltica con un 5% de PET no alcanzaron el mínimo necesario para ser utilizado en la construcción de calles.

Garzón et al. (2023) realizaron la investigación con la finalidad de presentar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas densas en caliente de 19mm con un contenido de residuos PET del 5%, 7.5% y 10% en volumen del asfalto utilizando el método de incorporación húmeda. Se realiza ensayos de laboratorio para determinar las propiedades de estas mezclas asfálticas, estas son, estabilidad y flujo, vacíos con aire y susceptibilidad a la humedad. De lo anterior se obtiene que cuando se aumenta la cantidad

de material PET en la mezcla asfáltica, disminuye la estabilidad Marshall y la susceptibilidad a la humedad, por otro lado, se incrementa los vacíos con aire y el flujo. En específico, la mezcla asfáltica con material PET en 5% de volumen de asfalto alcanza una estabilidad de 1438 kgf y un 76.4% de susceptibilidad a la humedad, estos valores representan un 97% y 93% respectivamente de la mezcla asfáltica convencional. Se concluye que al sustituir el asfalto por material PET en un porcentaje en volumen, tiene la posibilidad de ser empleado a favor de reducir la contaminación medioambiental.

Camacho et al. (2019) realizaron una investigación con el objetivo de determinar si una mezcla asfáltica adicionada con el 1% de PET logra resultados iguales o superiores a los obtenidos de una mezcla asfáltica convencional estandarizadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Asociación Española de Normalización (UNE). Asimismo, se realiza en ensayos de laboratorio para determinar las características y propiedades de la mezcla asfáltica adicionada con PET, estas son, la afinidad con agregados pétreos, adherencia en bandeja, deformación plástica, módulo resiliente, leyes de fatiga, estabilidad y densidad y flujo de Marshall. Con lo obtenido en los ensayos de laboratorio se determina si los valores de las propiedades y características obtenidos son similares a los normados. Finalmente, se concluye que la adherencia obtenida por la mezcla asfáltica con PET es de 96% lo cual cumple con la norma ya que en esta se especifica un mínimo de 80%, esto indica una buena homogeneidad. También, el módulo resiliente obtenido a 10° cumple con lo requerido con la norma cuyo valor es 10000 Mpa, sin embargo, para altas temperaturas no es recomendable el uso de esta mezcla asfáltica debido a que su módulo resiliente se reduce considerablemente. Por otro lado, su resistencia a la fatiga es buena según lo especificado en la norma, por lo que se garantiza que la reducción de la rigidez de dicha mezcla será lenta.

Basado en las investigaciones mencionadas, se observa que el estudio sobre diseño de pavimentos flexibles sostenibles utilizando material PET es viable, tomando en cuenta que dicho material reemplaza de manera parcial al agregado convencional o al asfalto en la mezcla asfáltica y mostrando resultados en sus propiedades mecánicas y físicas similares a la de la mezcla asfáltica convencional. En Perú no se encuentran muchos estudios sobre el tema. Por ello, en esta investigación se propone estudiar un diseño de una mezcla asfáltica para un pavimento flexible sostenible utilizando un material PET, cuya cantidad de desechos va en aumento en Villa El Salvador, contribuyendo en la reducción de este.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Pavimento

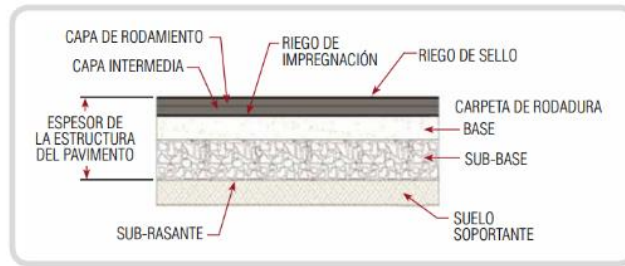
Según el Ministerio de Economía y Finanzas (2015), el pavimento es aquella estructura construida sobre la subrasante de una vía y está conformada por varias capas, para enfrentar y dispersar los esfuerzos generados por los vehículos con la finalidad de mejorar la seguridad y la comodidad del tráfico. El pavimento suele constar de distintas capas, la subbase, base y capa de rodadura.

- Subbase: se trata de una capa de material con un espesor definido y conforme a un diseño específico que actúa como soporte para la base y la capa superior del pavimento. Además de esta función estructural, también se emplea para facilitar el drenaje y regular la presencia de agua capilar. Según las características particulares del pavimento en términos de tipo, diseño y dimensiones, esta capa puede ser prescindible. Puede estar compuesta de material granular con un índice de resistencia CBR superior al 40%, o bien ser tratada con asfalto, cal o cemento.
- Base: es aquella capa que se encuentra debajo de la capa de rodadura y que tiene la función de sostener, distribuir y transferir las cargas generadas por el tráfico vehicular. Esta capa estará compuesta por material granular con capacidad de drenaje y un índice de resistencia CBR mayor al 80%, o bien será tratada con asfalto, cal o cemento.
- Capa de rodadura: es la capa superior del pavimento la cual puede ser de tipo bituminoso, flexible, de concreto de cemento portland, rígido, o de adoquines. Su principal función es soportar directamente el tráfico vehicular.

2.1.1 Tipos de pavimentos

2.1.1.1 Pavimento flexible

El pavimento flexible es una estructura conformada por varias capas de material granular, que incluyen una subbase y una base, y una capa superior de rodadura formada por una carpeta compuesta de materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y posiblemente aditivos. Principalmente, esta capa de rodadura se compone de asfalto y se coloca sobre las capas granulares. Como ejemplos se tiene al mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micro pavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente.

Figura 1.**Estructura de un pavimento flexible**

Nota: (Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras, Ministerio de Economía y Finanzas).

2.1.1.2 Pavimento semirrígido

Se trata de una estructura que se compone principalmente de capas de asfalto, con un espesor total que incluye una capa de carpeta asfáltica en caliente sobre una base tratada con asfalto. También se clasifica un pavimento semirrígido cuando la estructura consta de una capa de carpeta asfáltica sobre una base tratada con cemento o cal. Los pavimentos adoquinados también se consideran dentro de esta categoría de pavimento semirrígido.

2.1.1.3 Pavimento rígido

Es una estructura que consiste de una capa subbase compuesta principalmente por material granular, sin embargo, esta capa puede ser de base granular o estar estabilizada mediante cemento, asfalto o cal. Además, incluye una capa de rodadura hecha de losa de concreto de cemento hidráulico que contiene agregados y en ciertas circunstancias aditivos (pp. 13-15).

Figura 2.**Estructura de un pavimento rígido**

Nota: (Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras, Ministerio de Economía y Finanzas).

2.2 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas, conocidas también como aglomerados, está conformado por agregados rocosos y por un ligante asfáltico. Estas mezclas asfálticas se pueden utilizar para diversas construcciones importantes en el desarrollo de una sociedad, entre ellas tenemos a la más importante, las carreteras; aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. La composición aproximada de la mezcla asfáltica es 90% de agregados gruesos y finos, 5% de polvo mineral y 5% de ligante asfáltico. Estos materiales que conforman la composición de la mezcla asfáltica son de suma importancia para obtener una buena calidad en el funcionamiento del pavimento. Sin embargo, los materiales que influyen más en la calidad y costo del pavimento son el polvo de mineral y el ligante asfáltico (Gomez y Matamoros, 2022).

2.2.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Según Gomez y Matamoros (2022), las mezclas asfálticas se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.2.1.1 Por la temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: esta mezcla asfáltica se fabrica a temperaturas elevadas, alrededor de 150 grados centígrados dependiendo del ligante asfáltico. Asimismo, los agregados también se calientan para que cuando entre en contacto con el ligante asfáltico, este último no se enfríe. En obra, la temperatura empleada es una muy por encima de la temperatura ambiente debido a que se necesita que la mezcla se pueda extender y compactar correctamente.
- Mezclas asfálticas en frío: el ligante asfáltico viene a ser una emulsión asfáltica. En obra se emplea a temperatura ambiente.

2.2.1.2 Por la relación de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro es muy importante para no obtener deformaciones plásticas debido a los cambios de temperatura y al paso de cargas.

- Mezclas asfálticas densas o cerradas: la relación de vacíos es inferior al 6%.
- Mezclas asfálticas semi densas o semi cerradas: la relación de vacíos se encuentra en el intervalo de 6% y 10%.
- Mezclas abiertas: la relación de vacíos es mayor al 12%.
- Mezclas porosas o drenantes: la relación de vacíos es superior al 20%.

2.2.1.3 Por el tamaño máximo del agregado

- Mezclas finas: a estas mezclas asfálticas se le pueden llamar mortero asfáltico o microaglomerados, debido a que están conformados por agregado fino, el polvo mineral y el ligante asfáltico.
- Mezclas gruesas: el tamaño máximo del agregado supera los 10 mm.

2.2.1.4 Por la granulometría

- Mezclas continuas: buena distribución de los tamaños de agregados en los husos granulométricos.
- Mezclas discontinuas: mala distribución de los tamaños de agregados en los husos granulométricos.

2.2.2 Propiedades de las mezclas asfálticas

2.2.2.1 Estabilidad

Según ASTM D6927 (2022), la estabilidad es la resistencia de una mezcla asfáltica que se obtiene frente a la presencia de una carga a velocidad de deformación constante. Asimismo, también se le puede definir como la carga que se obtiene frente a una carga cuando su velocidad de aumento comienza a disminuir.

2.2.2.2 Flujo

Según MTC E504 (2016), el flujo Marshall es una medida de la deformación de las mezclas asfálticas que se obtiene durante el ensayo de estabilidad.

2.2.2.3 Porcentaje de vacíos

Según ASTM D3203 (2011), el porcentaje de vacíos son los espacios de aire presentes entre las partículas de agregados y el asfalto en una mezcla asfáltica compactada.

2.2.3 Mezclas asfálticas modificadas

Según Corbacho (2019), las mezclas asfálticas modificadas son el resultado de mezclar o disolver polímeros- o caucho triturado de neumáticos en el asfalto, o bien, reemplazar parte del agregado pétreo con estos elementos. Estas sustancias son estables ante el paso del tiempo y las variaciones de temperatura, con la finalidad de generar mezclas que presenten un comportamiento y rendimiento superiores.

2.2.3.1 Técnicas de modificación de mezclas asfálticas

Según Rondón y Reyes (2015), existen dos técnicas de modificación de mezclas asfálticas, la vía húmeda y la vía seca.

- Vía húmeda: el aditivo se incorpora al asfalto a alta temperatura y el asfalto modificado se adiciona a los agregados para obtener la mezcla asfáltica.
- Vía seca: el aditivo se incorpora y reemplaza una parte de los agregados, luego se adiciona el asfalto para obtener la mezcla asfáltica.

Asimismo, cuando se obtiene una mezcla asfáltica modificada, el comportamiento de esta es superior cuando se aplica la vía húmeda en comparación con la vía seca.

2.3 Normativas

2.3.1 Manual de carreteras, Especificaciones Técnicas generales para construcción EG-2013

2.3.1.1 Disposiciones generales

Según la norma nos indica las denominaciones de los materiales a utilizar en el diseño de mezcla asfáltica en caliente. Indica que se designará como agregado grueso a la fracción de agregado que queda retenida en el tamiz de 4,75 mm (N.º 4); mientras que al agregado fino se le atribuirá la porción que se encuentra entre los tamices de 4,75 mm y 75 µm (N.º 4 y N.º 200). Por otro lado, el polvo mineral o llenante se refiere a la porción que atraviesa el tamiz de 75 µm (N.º 200).

Selección del tipo de cemento asfáltico. El cemento asfáltico que se seleccionará para elaborar las mezclas asfálticas en caliente se clasifica por viscosidad absoluta y penetración. Esto va a depender de las condiciones climáticas del lugar.

Tabla 1.

Selección del tipo de cemento asfáltico

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C-15°C	15°C-5°C	Menos de 5°C
40-50 o			
60-70 o	60-70	85-100	Asfalto
modificado		120-150	Modificado

Nota: (Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013).

2.3.1.2 Pavimento de concreto asfáltico en caliente

Gradación. La gradación que deben tener la mezcla del agregado fino y agregado grueso debe cumplir con uno de los husos granulométricos para la mezcla asfáltica en caliente que se presenta.

Tabla 2.

Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N° 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N° 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N° 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N° 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N° 200)	4-8	4-8	5-10

Nota: (Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013).

Requerimiento de construcción de la mezcla asfáltica en caliente. Las mezclas asfálticas en caliente deben cumplir ciertos requisitos o parámetros de calidad los cuales se indican en el presente manual.

Tabla 3.

Requisitos para mezcla asfáltica en caliente

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
	Millones de ejes equivalentes		
	>3	0.3-3	≤0.3
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo) kN (Kg)	8.15 kN (832 Kg)	5.44 Kn (555 Kg)	4.53 kN (461 Kg)
3. Flujo 0.01" (0.25 mm)	8-14	8-15	8-16
Flujo (mm)	2-3.6	2-4.1	2-5.1
4. Porcentaje de vacíos con aire	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos llenos con asfalto (VFA)	65%-75%	65%-78%	70%-80%

Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto	0.6 – 1.3	0.6 – 1.3	0.6 – 1.3
Relación Estabilidad/Flujo	1.7 – 4		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín		

Nota: (Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013).

Tabla 4.

Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2.36 mm (N°8)	21	-
4.75 mm (N°4)	18	-
9.50 mm (3/8")	16	15
12.5 mm (1/2")	15	14
19.0 mm (3/4")	14	13
25.0 mm (1")	13	12
37.5 mm (1 1/2")	12	11
50.0 mm (2")	11.5	10.5

Nota: (Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013).

2.3.2 American Society for Testing and Materials (ASTM) C127 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate / MTC E 206 Peso específico y absorción de agregados gruesos

Tiene como objetivo obtener del agregado su peso específico seco, su peso específico superficialmente seca, su peso específico aparente y su absorción al tener el agregado grueso sumergido en agua después de 24 horas.

El alcance es tener una muestra de agregado grueso sumergida en agua durante un aproximado de 24 horas para llenar los poros. Después, se seca superficialmente y se pesa. Luego, se pesa la muestra sumergida en agua y al final se seca en el horno y se vuelve a pesar. Con ello, se puede obtener 3 pesos específicos y la absorción del agregado grueso (MTC E 206, 2016).

Para los cálculos se tienen las siguientes fórmulas:

- Peso específico de masa (Pem)

$$Pem = \frac{A}{B-C} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A: Peso de la muestra seca en aire, gramos.

B: Peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire, gramos.

C: Peso en el agua de la muestra saturada.

- Peso específico de masa saturada con superficie seca (Pesss)

$$Pesss = \frac{B}{B-C} \times 100 \quad (2)$$

- Peso específico aparente (Pea)

$$Pesss = \frac{A}{A-C} \times 100 \quad (3)$$

- Absorción (Ab)

$$Ab(\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (4)$$

2.3.3 American Society for Testing and Materials (ASTM) C128 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate / MTC E 205 Gravedad específica y absorción de agregados finos

Tiene como objetivo obtener del agregado fino su peso específico, su peso específico saturado superficialmente seca, su peso específico aparente y su absorción al tenerlo sumergido por 24 horas (MTC E 205, 2016).

Para los cálculos se tienen las siguientes fórmulas:

- Peso específico de masa (Pem)

$$Pem = \frac{Wo}{V-Va} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

Pem: Peso específico de masa.

Wo: Peso en el aire de la muestra secada en el horno, g.

V: Volumen del frasco en cm³.

Vo: Peso en gramos o volumen en cm³ de agua añadida al frasco.

- Peso específico de masa saturado con superficie seca (Pesss)

$$Pesss = \frac{500}{V-Va} \times 100 \quad (6)$$

- Peso específico aparente (Pea)

$$Pea = \frac{W_o}{(V-Va)-(500-W_o)} \times 100 \quad (7)$$

- Absorción (Ab)

$$Ab = \frac{500-W_o}{W_o} \times 100 \quad (8)$$

2.3.4 Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall

Tiene como objetivo determinar el diseño de una mezcla asfáltica y de calcular sus parámetros de comportamiento utilizando el método manual Marshall a partir de la preparación y compactación de especímenes de mezcla bituminosa para pavimentación, cuyas dimensiones son, altura nominal de 64 mm y diámetro de 102 mm.

Además, los resultados de los ensayos de estabilidad y flujo consisten en haber ensayado 3 especímenes por cada incremento en el contenido de ligante. Estos incrementos van a ser cada 0.5% dentro de un rango de contenido de ligante.

Las notables discrepancias en la estabilidad y flujo Marshall entre diferentes ensayos o con respecto a la media de un conjunto extenso de datos o muestras de una mezcla fabricada en una planta podrían señalar problemas como una mezcla deficiente, métodos de ensayo incorrectos, alteraciones en la gradación, modificaciones en el contenido del ligante o fallos en el proceso de la planta. Es crucial identificar el origen de esta variabilidad y tomar medidas para resolver el problema (MTC E-504, 2016).

Con respecto a la precisión, no se establece un estándar de precisión específico en este procedimiento. La aceptación o rechazo de los especímenes se basará en otros ensayos que sigan los criterios aplicables. En el caso de la determinación de la estabilidad y flujo Marshall de acuerdo con la Práctica D 6926, se deben considerar únicamente los especímenes duplicados cuyo peso específico aparente se encuentre dentro de $\pm 0,02$ en comparación con su valor promedio.

Para calcular la estabilidad corregida del espécimen se multiplica la estabilidad obtenida con el aparato Marshall por un factor que depende del volumen del espécimen.

$$A = B \times C \quad (9)$$

Donde:

A: Estabilidad corregida.

B: Medida de la estabilidad (carga).

C: Razón de correlación de la tabla.

Tabla 5.

Factores de Estabilidad de Correlación

Volumen del espécimen, cm ³	Espesor del espécimen		Razón de la correlación
	mm	Pulg	
200 – 213	25.4	1.00 (1)	5.56
214 – 225	27	1.06 (1 1/16)	5
226 – 237	28.6	1.12 (1 1/8)	4.55
238 – 250	30.2	1.19 (1 3/16)	4.17
251 – 264	31.8	1.25 (1 ¼)	3.85
265 – 276	33.3	1.31 (1 5/16)	3.57
277 – 289	34.9	1.38 (1 3/8)	3.33
290 – 301	36.5	1.44 (1 7/16)	3.03
302 – 316	38.1	1.50 (1 ½)	2.78
317 – 328	39.7	1.56 (1 9/16)	2.5
329 – 340	41.3	1.62 (1 5/8)	2.27
341 – 353	42.9	1.69 (1 11/16)	2.08
354 – 367	44.4	1.75 (1 ¾)	1.92
368 – 379	46	1.81 (1 13/16)	1.79
380 – 392	47.6	1.88 (1 7/8)	1.67
393 – 405	49.2	1.94 (1 15/16)	1.56
406 – 420	50.8	2.00 (2)	1.47
421 – 431	52.4	2.06 (2 1/16)	1.39
432 – 443	54	2.12 (2 1/8)	1.32
444 – 456	55.6	2.19 (2 3/16)	1.25
457 – 470	57.2	2.25 (2 ¼)	1.19
471 – 482	58.7	2.31 (2 5/16)	1.14
483 – 495	60.3	2.38 (2 3/8)	1.09
496 – 508	61.9	2.44 (2 7/16)	1.04
509 – 522	63.5	2.50 (2 ½)	1
523 – 535	65.1	2.56 (2 9/16)	0.96
536 – 546	66.7	2.62 (2 5/8)	0.93
547 – 559	68.3	2.70 (2 11/16)	0.89
560 – 573	69.8	2.75 (2 ¾)	0.86
574 – 585	71.4	2.81 (2 13/16)	0.83
586 – 598	73	2.88 (2 7/8)	0.81
599 – 610	74.6	2.94 (2 15/16)	0.78
611 – 626	76.2	3.00 (3)	0.76

Nota: (Manual de Ensayo de Materiales, MTC E 504).

2.3.5 American Society for Testing and Materials (ASTM) D3549/D3549M – 18 Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Asphalt Mixture Specimens / MTC E 507 Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas de pavimento asfáltico

Tiene como objetivo determinar la altura o espesor de los especímenes de las mezclas asfálticas compactadas. Para ello se puede realizar de dos maneras, la primera es la medición directa con equipos de medición como reglas o winchas, calibradores u otros equipos de medición. La otra manera es calculando la división del volumen del espécimen entre su área transversal (MTC E-507, 2016).

$$\text{Espesor, cm} = \frac{\text{Volumen(cm}^3\text{)}}{\text{Área(cm}^2\text{)}} \quad (10)$$

2.3.6 American Society for Testing and Materials (ASTM) D2041/D2041M-11 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures

El ensayo para calcular la gravedad específica y densidad máxima teórica de las mezclas bituminosas de pavimentación consiste en colocar una porción pesada de una mezcla de pavimentación que ha sido previamente secada al horno en un recipiente de vacío previamente calibrado. Luego, se agrega la cantidad necesaria de agua a una temperatura de 25°C para sumergir completamente la muestra. Se procede a reducir gradualmente la presión en el recipiente de vacío hasta alcanzar un valor de 4 kPa o menos, y se mantiene esta presión durante un período de 15 ± 2 minutos. Al concluir este período de vacío, se libera gradualmente la presión.

Para determinar el volumen de la muestra de mezcla de pavimentación, se sumerge el recipiente de vacío, junto con la muestra, en un baño de agua y se registra su peso, o bien se llena el recipiente de vacío hasta el nivel deseado con agua y se mide su peso en condiciones normales de presión. En este momento, se toma nota de la temperatura y la masa. A partir de estas mediciones de masa y volumen, se calcula la densidad o el peso específico de la mezcla a 25°C (ASTM D2041/D2041M-11, 2011).

$$Gmm = \frac{A}{A+D-E} \quad (11)$$

Donde:

A: Masa de la muestra seca en aire, g

D: Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g

E: Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g

2.3.7 American Society for Testing and Materials (ASTM) D2726/D2726M-17 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures

El procedimiento del ensayo para obtener la gravedad específica y densidad de mezclas asfálticas implica sumergir el espécimen en un baño de agua a una temperatura de 25°C. Luego, se registra la masa mientras está bajo el agua, se retira el espécimen del agua, se seca cuidadosamente con una toalla de tela húmeda y se pesa en condiciones normales de aire. La diferencia entre estas dos masas se emplea para determinar la masa equivalente de un volumen igual de agua a 25°C.

Este método de ensayo ofrece pautas para calcular la masa seca al horno o completamente seca de la muestra. El peso específico aparente se determina a partir de estas masas. Posteriormente, la densidad se obtiene multiplicando el peso específico de la muestra por la densidad del agua (ASTM D2726/D2726M-17, 2017).

$$\text{Bulk sp gr} = \frac{A}{B-C} \quad (12)$$

Donde:

A: masa del espécimen seco en el aire, g.

(B-C): masa del volumen de agua para el volumen de la muestra a 25°C.

B: masa del espécimen saturado superficialmente seco, g.

C: masa del espécimen en agua, g.

2.3.8 MS-2 Asphalt Mix Design Methods. Manual Series N°2-7th Edition

2.3.8.1 Preparación de especímenes de ensayo

En el caso de diseños de mezclas en caliente que emplean un promedio de agregados, se planifican los ensayos mediante la preparación de una muestra con una cantidad de asfalto establecida de acuerdo con el procedimiento de Equivalente de Kerosene centrifugado (CKE). Esto incluye dos especímenes con un contenido de asfalto un 0.5 por ciento por encima de la cantidad CKE, y un espécimen con un contenido un 0.5 por ciento por debajo de la cantidad CKE, lo que suma un total de cuatro muestras, cada una con una cantidad distinta de asfalto.

En situaciones donde las mezclas se consideran críticas, es decir, sensibles a las variaciones en el contenido de asfalto, se ajustan los pasos en el contenido de asfalto a un 0.3 por ciento, y los ensayos se organizan de acuerdo con el contenido de asfalto aproximado indicado por el procedimiento CKE. Esto implica preparar tres especímenes con un contenido de asfalto un 0.3 por ciento por encima de la cantidad CKE y un espécimen con un contenido un 0.3 por ciento por debajo de la cantidad CKE.

En el caso de agregados altamente absorbentes y mezclas no consideradas críticas, se recomienda aumentar los incrementos en el contenido de asfalto a un 1.0 por ciento en lugar del 0.5 por ciento habitual, y emplear más muestras según sea necesario.

Cuando el asfalto se ha mezclado con una mezcla de aglomerado altamente absorbente, se debe fijar el contenido de asfalto en un 1.0 por ciento en lugar del 0.5 por ciento, y se deben utilizar más probetas si es necesario.

Además, se procede a preparar dos muestras de expansión con el mismo contenido de asfalto que se ha determinado a partir de los ensayos realizados en la serie de muestras diseñadas para los ensayos con el estabilómetro.

En la mayoría de los casos, se compacta el asfalto en la capa de rodadura. En situaciones en las que el asfalto no es asfáltico, se asegura que el material asfáltico sea de naturaleza asfáltica y que el proceso de compactación se realice de acuerdo con los estándares adecuados de asfaltado (Asphalt Institute, 2014).

2.4 Diseño de pavimentos

2.4.1 Vías colectoras

Este tipo de vías están diseñadas para dirigir el tránsito desde las vías locales a las vías arteriales o viceversa facilitando el tránsito vehicular y el acceso a las propiedades cercanas. El flujo vehicular suele ser interrumpido por semáforos en las intersecciones con las vías arteriales y con señalización simple horizontal o vertical con las vías locales. El estacionamiento se realiza en áreas contiguas y el uso de estas vías son para todo tipo de vehículo (CE.010 Pavimentos urbanos, 2010).

2.4.2 Estudio de tráfico

2.4.2.1 Volumen Horario de Diseño (VHD)

En vías de alto tránsito en lugar de utilizar el Índice Medio Diario Anual (IMDA) como parámetro de diseño del proyecto se utiliza el Volumen Horario de Diseño (VHD) para determinar las características y condiciones de servicio de la vía a diseñar, esto se basa

en determinar cuál es el volumen de tránsito por hora para dicho diseño de la vía. Además, existe una relación empírica entre el VHD y el IMD el cual el primero corresponde entre un 12% y 18% del IMD (Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018, 2018).

$$VHD = 0.12 \sim 0.18 \text{ IMD} \quad (13)$$

2.4.2.2 Factor direccional (Fd) y factor carril (Fc)

El factor direccional es una relación que indica la cantidad de vehículos pesados que circulan en un sentido o dirección de la vía. Asimismo, el factor carril indica la relación del carril que recibe la mayor cantidad de ejes equivalentes que fluye por dicho carril (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Tabla 6.

Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el Carril de Diseño

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño
1 calzada (para IMDa total de la calzada)	1 sentido	1	1.00	1.00	1.00
	1 sentido	2	1.00	0.80	0.80
	1 sentido	3	1.00	0.60	0.60
	1 sentido	4	1.00	0.50	0.50
	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
2 calzadas con separador central (para IMDa total de las dos calzadas)	2 sentidos	1	0.50	1.00	0.50
	2 sentidos	2	0.50	0.80	0.40
	2 sentidos	3	0.50	0.60	0.30
	2 sentidos	4	0.50	0.50	0.25

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.2.3 Tasa de crecimiento vehicular

La tasa de crecimiento vehicular depende del crecimiento social y económico. Para los vehículos ligeros o de transporte de pasajeros se relaciona con la tasa de crecimiento anual poblacional y para los vehículos pesados con la tasa de crecimiento anual económica como el Producto Bruto Interno (PBI). Además, se puede calcular el tránsito proyectado para el periodo de diseño según una fórmula de progresión geométrica (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

$$Ton = To(1 + r)^{n-1} \quad (14)$$

Donde:

Ton: Tránsito proyectado al año “n” en veh/día.

To: Tránsito actual (año base o) en veh/día.

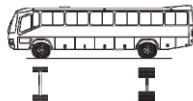
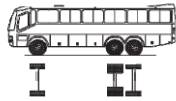




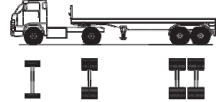
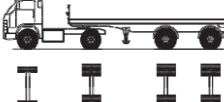
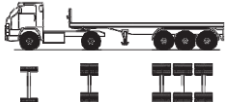
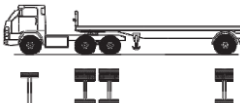
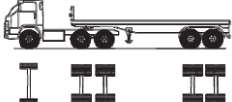

n: Número de años del periodo de diseño.

r: Tasa anual de crecimiento del tránsito.

2.4.2.4 Factor vehículo pesado (Fvp)

Las medidas y pesos de los vehículos se miden con balanzas dinámicas móviles o fijas, medición manual o automática, verificación física del vehículo y de la carga o mercancía que transporta (Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto Supremo N° 058-2003-MTC, 2003).

Tabla 7.*Pesos y medidas máximas permitidas*

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS										
N°	Conf. Vehicular	N° de ejes	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx (m)	Eje Delantero	Peso máximo (t)				Peso bruto máx (t)
						Conjunto de ejes posteriores				
						1°	2°	3°	4°	
1	B2	2		14	7	11	-	-	-	18
2	B3-1	3		14 (convencional) 15 (integral)	7	16	-	-	-	23
3	C2	2		12.3	7	11	-	-	-	18
4	C3	3		13.2	7	18	-	-	-	25
5	C4	4		13.2	7	23	-	-	-	30
6	T2S1	3		20.5	7	11	11	-	-	29
7	T2S2	4		20.5	7	11	18	-	-	36
8	T2Se2	4		20.5	7	11	11	11	-	40
9	T2S3	5		20.5	7	11	25	-	-	43
10	T3S1	4		20.5	7	18	11	-	-	36
11	T3S2	5		20.5	7	18	18	-	-	43
12	T3S3	6		22	7	18	25	-	-	50

Nota: (Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto Supremo N° 058- 2003-MTC, 2003).

2.4.2.5 Factor de ajuste por presión de neumático (Fp)

El factor de presión de neumático se utiliza para considerar el deterioro que causa la presión de los neumáticos a la capa de rodadura, se pueden usar los valores de la tabla los cuales se deducen del manual MS-1 del Instituto del Asfalto (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Tabla 8.

Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalentes (EE)

Espesor de Capa de Rodadura (mm)	Presión de Contacto del Neumático (PCN) en psc PCN=0.90x[Presión de inflado del neumático] (pai)						
	80	90	100	110	120	130	140
50	1.00	1.30	1.80	2.13	2.91	3.59	4.37
60	1.00	1.33	1.72	2.18	2.69	3.27	3.92
70	1.00	1.30	1.65	2.05	2.49	2.99	3.53
80	1.00	1.28	1.59	1.94	2.32	2.74	3.20
90	1.00	1.25	1.53	1.84	2.17	2.52	2.91
100	1.00	1.23	1.48	1.75	2.04	2.35	2.68
110	1.00	1.21	1.43	1.66	1.91	2.17	2.44
120	1.00	1.19	1.38	1.59	1.80	2.02	2.25
130	1.00	1.17	1.34	1.52	1.70	1.89	2.09
140	1.00	1.15	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94
150	1.00	1.13	1.26	1.39	1.52	1.66	1.79
160	1.00	1.12	1.24	1.36	1.47	1.59	1.71
170	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	0.61
180	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.53
190	1.00	1.08	1.16	1.24	1.31	1.39	1.46
200	1.00	1.08	1.15	1.22	1.28	1.35	1.41

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.2.6 Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes

Para el cálculo del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 ton para un periodo de diseño determinado se usará la siguiente fórmula para los diferentes tipos de vehículos pesados (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

$$N_{rep\ de\ EE_{8.2\ ton}} = \sum [EE_{día-carril} \times F_{ca} \times 365] \quad (15)$$

Donde:

N_{rep de EE 8.2 ton}: Número de repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 ton.

$EE_{\text{día-carril}}$: Ejes equivalentes por cada tipo de vehículo pesado, por día para el carril de diseño.

$$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times F_d \times F_c \times F_{vpi} \times F_{pi} \quad (16)$$

Donde:

IMD_{pi} : corresponde al Índice Medio Diario según tipo de vehículo pesado.

F_d : factor direccional.

F_c : factor carril de diseño.

F_{vpi} : factor vehículo pesado del tipo seleccionado.

F_{pi} : factor de presión de neumáticos.

F_{ca} : Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado.

365: número de días del año.

2.4.3 Método de diseño AASHTO 93

Este método de diseño toma en cuenta la performance del pavimento, las cargas vehiculares y resistencia de la subrasante. Estos datos se utilizan para calcular el Número Estructural Requerido (SNr) para luego determinar los espesores de las capas estructurales del pavimento considerando su serviciabilidad, el periodo de diseño y cargas vehiculares (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.1 Periodo de diseño

El periodo de diseño que se utiliza en este método para vías de bajo volumen vehicular es de 10 años, por otro lado, para vías con mayor volumen de tráfico se puede utilizar periodos de diseño de 10 y 20 años. Asimismo, si se desea utilizar otro periodo de diseño según lo requerido el ingeniero encargado debe sustentar de acuerdo al proyecto (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2 Número estructural Requerido

La fórmula para el cálculo del número estructural requerido para pavimentos flexibles según el método AASHTO 93 es la siguiente:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log_{10} \left(\frac{(\Delta PSI)}{4.2 - 1.5} \right)}{0.4 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_R) - 8.0 \quad (17)$$

Las variables que se encuentran en dicha fórmula son las siguientes:

2.4.3.2.1 Ejes equivalentes (W18)

Es el número acumulado de ejes simples equivalentes para un determinado periodo de diseño. Dicho valor corresponde a los EE de 8.2 ton basados en el estudio de tráfico realizado (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2.2 Módulo Resiliente (M_R)

Es la cuantificación de la rigidez de la subrasante. Este módulo se puede determinar mediante una correlación con el CBR de la subrasante; se puede utilizar la fórmula de correlación publicada por la TRRL (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

$$M_R(PSI) = 2555 \times CBR^{0.64} \quad (18)$$

2.4.3.2.3 Confiabilidad (%R)

Es la probabilidad relacionada al comportamiento de la estructura de un pavimento durante su periodo de diseño considerando diferentes factores que se pueden ver afectados como, la construcción de esta, condiciones climáticas, crecimiento del tráfico pesado, etc. Sin embargo, el parámetro a usar en la fórmula para el cálculo del número estructural requerido es el coeficiente estadístico de desviación estándar normal (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Tabla 9.

Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES		NIVEL DE
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	Tp0	75,000	150,000	65%
	Tp1	150,001	300,000	70%
	Tp2	300,001	500,000	75%
	Tp3	500,001	750,000	80%
	Tp4	750,001	1,000,000	80%
Restos de Caminos	Tp5	1,000,001	1,500,000	85%
	Tp6	1,500,001	3,000,000	85%
	Tp7	3,000,001	5,000,000	85%
	Tp8	5,000,001	7,500,000	90%
	Tp9	7,500,001	10,000,000	90%

Tp10	10,000,001	12,500,000	90%
Tp11	12,500,001	15,000,000	90%
Tp12	15,000,001	20,000,000	95%
Tp13	20,000,001	25,000,000	95%
Tp14	25,000,001	30,000,000	95%
Tp15	> 30,000,000		95%

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2.4 Coeficiente estadístico de Desviación Estándar Normal (Z_R)

Es el valor correspondiente a la confiabilidad escogida para los datos en una distribución normal.

Tabla 10.

Coeficiente Estadístico de la Desviación Estándar Normal (Z_R) para una sola etapa de diseño (10 o 20 años) según el nivel de confiabilidad seleccionado y el rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES		NIVEL DE
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	Tp0	75,000	150,000	-0.385
	Tp1	150,001	300,000	-0.524
	Tp2	300,001	500,000	-0.674
	Tp3	500,001	750,000	-0.842
	Tp4	750,001	1,000,000	-0.842
Restos de Caminos	Tp5	1,000,001	1,500,000	-1.036
	Tp6	1,500,001	3,000,000	-1.036
	Tp7	3,000,001	5,000,000	-1.036
	Tp8	5,000,001	7,500,000	-1.282
	Tp9	7,500,001	10,000,000	-1.282
	Tp10	10,000,001	12,500,000	-1.282
	Tp11	12,500,001	15,000,000	-1.282
	Tp12	15,000,001	20,000,000	-1.645
	Tp13	20,000,001	25,000,000	-1.645
	Tp14	25,000,001	30,000,000	-1.645
	Tp15	> 30,000,000		-1.645

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2.5 Desviación Estándar Combinada (S_o)

Este valor considera la variabilidad de los factores que tienen incidencia en el comportamiento del pavimento como, el medio ambiente, construcción, el tráfico, etc. Según la guía AASHTO 93 estos valores se encuentran entre 0.40 y 0.50 para pavimento flexibles, sin embargo, el MTC recomienda utilizar 0.45 (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2.6 Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

Es el valor relacionado con la comodidad que se ofrece al usuario este valor varía de 0 a 5, en donde 5 es la mejor comodidad teórica y 0 la peor. Asimismo, tenemos la Serviciabilidad Inicial (Pi) lo cual corresponde a una vía recién construida. También se tiene la Serviciabilidad Final (Pt) cuyo valor corresponde a una vía que requiere de rehabilitación o reconstrucción. La diferencia de ambas se denomina Diferencial de Serviciabilidad (ΔPSI) (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Tabla 11.

Índice de Serviciabilidad Inicial (Pi), Serviciabilidad Final (Pt) y Diferencial de Serviciabilidad (ΔPSI) según rango de tráfico

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (Pi)	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (Pt)	DIFERENCIAL DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	Tp0	75,000	150,000	3.80	2.00	1.80
	Tp1	150,001	300,000	3.80	2.00	1.80
	Tp2	300,001	500,000	3.80	2.00	1.80
	Tp3	500,001	750,000	3.80	2.00	1.80
	Tp4	750,001	1,000,000	3.80	2.00	1.80
Restos de Caminos	Tp5	1,000,001	1,500,000	4.00	2.50	1.50
	Tp6	1,500,001	3,000,000	4.00	2.50	1.50
	Tp7	3,000,001	5,000,000	4.00	2.50	1.50
	Tp8	5,000,001	7,500,000	4.00	2.50	1.50
	Tp9	7,500,001	10,000,000	4.00	2.50	1.50
	Tp10	10,000,001	12,500,000	4.00	2.50	1.50
	Tp11	12,500,001	15,000,000	4.00	2.50	1.50
	Tp12	15,000,001	20,000,000	4.20	3.00	1.20
	Tp13	20,000,001	25,000,000	4.20	3.00	1.20
	Tp14	25,000,001	30,000,000	4.20	3.00	1.20
	Tp15	> 30,000,000		4.20	3.00	1.20

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.3.2.7 Número Estructural Propuesto (SNR)

Este valor considera los espesores efectivos de las capas estructurales del pavimento y coeficientes para la capa de rodadura, base y subbase (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014). Se obtiene aplicando la ecuación siguiente:

$$SN = a_1 \times d_1 + a_2 \times d_2 \times m_2 + a_3 \times d_3 \times m_3 \quad (19)$$

Donde:

a_1 , a_2 , a_3 = coeficientes estructurales de la base y subbase, respectivamente

d_1, d_2, d_3 = espesores (en centímetros) de la base y subbase, respectivamente

m_2, m_3 = coeficientes de drenaje para la base y subbase, respectivamente

Tabla 12.

Coefficientes estructurales de las capas del pavimento a_i

COMPONENTE DEL PAVIMENTO	COEFICIENTE	VALOR COEFICIENTE ESTRUCTURAL a_i (cm)	OBSERVACIÓN
CAPA SUPERFICIAL			
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 Mpa (430,000 PSI) a 20°C (68°F)	a_1	0.170/cm	Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico. Este es un valor Máximo y de utilizarse como tal, el expediente de ingeniería debe ser explícito en cuanto a pautas de cumplimiento obligatorio como realizar : - Un control de calidad riguroso - Indicar un valor de Estabilidad Marshal, superior a 1000 kf-f - Alertar sobre la susceptibilidad al fisuramiento térmico y por fatiga (AASHTO 1993)
Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión	a_1	0.125/cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Micropavimento 25 mm	a_1	0.130/cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Tratamiento Superficial Bicapa	a_1	(*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE. No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8%; y, en vías con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
Lechada asfáltica (slurry seal) de 12 mm	a_1	(*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8% y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
(*) no se considera por no tener aporte estructural			
BASE			
Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS	a_2	0.052/cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Base Granular CBR 100%, compactada al 100% de la MDS	a_2	0.054/cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $> 1'000,000$ EE
Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500 lb)	a_2	0.115/cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35 kg/cm ²)	a_2	0.070/cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm ²)	a_2	0.080/cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
SUBBASE			
Subbase Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS	a_3	0.047/cm	Capa de Subbase recomendada con CBR mínimo 40%, para todos los tipos de Tráfico

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Asimismo, el manual contempla coeficientes de drenaje recomendables para base y subbase y valores recomendables de espesores mínimos de capa superficial y base granular.

Tabla 13.

Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje m_i para bases y subbases granulares no tratadas en pavimentos flexibles

CALIDAD DEL DRENAJE	P=% DEL TIEMPO EN QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES			
	MENOR QUE 1%	1% - 5%	5% - 25%	MAYOR QUE 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20

Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Insuficiente	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy insuficiente	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

Tabla 14.

Valores recomendados de espesores mínimos de capa superficial y base granular

TIPO DE CAMINOS	TRÁFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		CAPA SUPERFICIAL	BASE GRANULAR
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	Tp0	75,000	150,000	-	-
	Tp1	150,001	300,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frío:	150 mm
	Tp2	300,001	500,000	TSB, o Lechada Asfáltica (Slurry seal): 12mm, o Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frío:	150 mm
	Tp3	500,001	750,000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frío: 60mm Carpeta Asfáltica en Caliente: 70mm	151 mm
	Tp4	750,001	1,000,000	Micropavimento: 25mm Carpeta Asfáltica en Frío: 70mm Carpeta Asfáltica en Caliente: 80mm	200 mm
Restos de Caminos	Tp5	1,000,001	1,500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 80mm	200 mm
	Tp6	1,500,001	3,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 90mm	200 mm
	Tp7	3,000,001	5,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 90mm	200 mm
	Tp8	5,000,001	7,500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 100mm	250 mm
	Tp9	7,500,001	10,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 110mm	250 mm
	Tp10	10,000,001	12,500,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 120mm	250 mm
	Tp11	12,500,001	15,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 130mm	250 mm
	Tp12	15,000,001	20,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 140mm	250 mm

Tp13	20,000,001	25,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 150mm	300 mm
Tp14	25,000,001	30,000,000	Carpeta Asfáltica en Caliente: 150mm	300 mm
Tp15	> 30,000,000		-	-

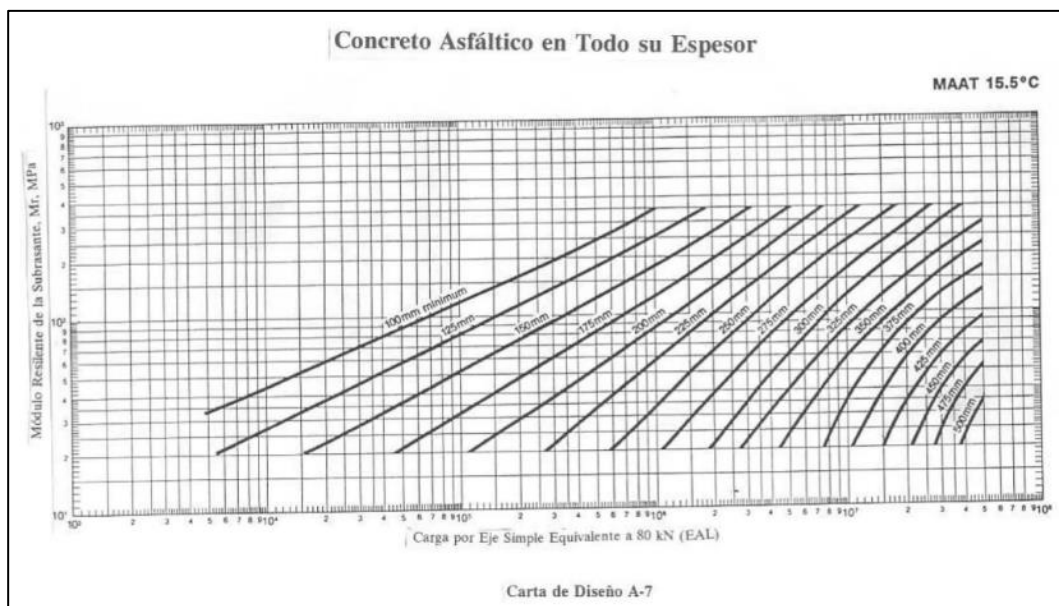
Nota: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos, 2014).

2.4.4 Espesor pleno

Para determinar el espesor pleno de un pavimento asfáltico o el espesor de un “Pavimento asfáltico en todo su espesor” se puede usar las cartas de diseño con una precisión de 25 mm (MS-1 Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets, 1991).

Figura 3.

Carta de diseño para espesor pleno de pavimento asfáltico



Nota: (MS-1 Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets, 1991).

2.4.5 Fallas en el pavimento flexible

2.4.5.1 Modelos de fracturamiento por fatiga

El daño de fracturamiento por fatiga se da en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. Teóricamente este daño se da cuando el número de repeticiones que se obtienen del estudio de tráfico y el número de repeticiones permisibles son iguales. Este número de

repeticiones permisibles se puede calcular mediante un método de diseño la cual diferentes instituciones han propuesto (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

El número de repeticiones permisibles se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} E_1^{-f_3} \quad (20)$$

Donde:

N_f : número de repeticiones permisibles

f_1, f_2, f_3 : son constantes

ε_t : deformación de tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica

E_1 : módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica

De dicha expresión, la ecuación del Instituto del Asfalto es:

$$N_f = 0.0796 \varepsilon_t^{-3.291} E_1^{-0.854} \quad (21)$$

Y la ecuación de la compañía Shell es:

$$N_f = 0.0685 \varepsilon_t^{-5.671} E_1^{-2.363} \quad (22)$$

Asimismo, se puede considerar algunos valores para el módulo de elasticidad y relaciones de Poisson para materiales de pavimentos flexibles.

Tabla 15.

Módulos elásticos (E) típicos en materiales para pavimentación

Material	Rango (MPa)	Valor típico (MPa)
Carpeta Asfáltica Convencional	2000-4000	3000
Carpeta Asfáltica con asfalto modificado	4000-6000	5000
Base estabilizada con cemento	750-2000	1500
Base estabilizada con asfalto	500-1500	1000
Base hidráulica	270-350	310
Subrasante	190-260	220

Nota: (Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

Tabla 16.*Relaciones de Poisson (ν) típicas en materiales para pavimentación*

Material	Rango	Valor típico
Carpeta Asfáltica Convencional	0.15-0.45	0.30
Carpeta Asfáltica con asfalto modificado	0.15-0.30	0.20
Base estabilizada con cemento	0.15-0.30	0.20
Base estabilizada con asfalto	0.15-0.45	0.30
Base hidráulica	0.30-0.40	0.35
Subrasante	0.30-0.50	0.40

Nota: (Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

2.4.5.2 Modelos de deformación permanente

El daño por deformación permanente está relacionado con el esfuerzo que se da en la fibra superior de la subrasante del pavimento. El método para determinar el número de repeticiones admisibles relaciona la deformación vertical ε_c en la fibra superior de la subrasante (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (23)$$

Donde:

 N_d : número de repeticiones admisibles f_4, f_5 : son constantes ε_c : deformación de compresión en la fibra superior de la subrasante

Las constantes f_4 y f_5 que se tienen para diferentes instituciones son las siguientes:

Tabla 17.*Criterios de deformación utilizados por diversas instituciones*

INSTITUCIÓN	f4	f5
Compañía Shell		
50% de confiabilidad	$6.15 \cdot 10^{-7}$	4.00
85% de confiabilidad	$1.94 \cdot 10^{-7}$	4.00
95% de confiabilidad	$1.05 \cdot 10^{-7}$	4.00
Instituto del Asfalto	$1.365 \cdot 10^{-9}$	4.48

Nota: (Instituto Mexicano del Transporte, 1998).

Capítulo III: Determinación de la estabilidad de Marshall del diseño de mezcla asfáltica con material PET reciclado

3.1 Procedimiento

3.1.1 Materiales

Para el diseño de la mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica con incorporación de material PET se utiliza agregado grueso, agregado fino, cemento asfáltico PEN 60/70 y polietileno teraftalato (PET). En el siguiente cuadro se presenta el material y su procedencia.

Tabla 18.

Materiales para la mezcla asfáltica y su procedencia

Material	Procedencia
Agregado grueso	Cantera Global – Carapongo
Agregado fino	Cantera Excalibur – Lurín
Cemento asfáltico	Repsol
Botellas de agua Cielo 7L (Polietileno teraftalato, PET) triturado con tamaño retenido entre tamiz N°4 y N°10	Propio

Nota: Elaboración propia

3.1.2 Muestreo de agregados para ensayos de laboratorio

Se realiza el muestreo de los agregados, tanto para grueso y fino de acuerdo a la norma NTP 400.043 (2021), utilizando el método de cuarteo para reducir las muestras a tamaño de ensayo.

Muestra de agregado grueso y reducción a tamaño de ensayo. Para obtener la muestra requerida según la NTP 400.043 para realizar el ensayo de análisis granulométrico, se coloca la muestra de agregado grueso inicial sobre el suelo, superficie dura y limpia. Se coloca en la muestra en una forma de cono de base circular para tener mayor homogeneidad, luego se achata la parte superior y se cuarteo con la pala.

Figura 4.

Muestra de agregado grueso y colocación de muestra de cono en superficie dura y limpia



Nota: Elaboración propia

Figura 5.

Primer cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia



Nota: Elaboración propia

Figura 6.

Segundo cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia



Nota: Elaboración propia

Figura 7.

Tercer y último cuarteo y colocación de dos cuartos en cono en superficie dura y limpia



Nota: Elaboración propia

Figura 8.

Muestra de agregado grueso para análisis granulométrico



Nota: Elaboración propia

Muestra de agregado fino y reducción a tamaño de ensayo

Para el agregado fino se realiza el mismo procedimiento de reducción de muestra que para el agregado grueso. Se realizan los cuarteos hasta obtener una cantidad adecuada para realizar el ensayo de análisis granulométrico. Finalmente, la muestra de ensayo de agregado fino se coloca en el horno a 110 ± 5 °C.

Figura 9.

Muestra de agregado grueso, colocación de muestra de cono en superficie dura y limpia y primer cuarteo.



Nota: Elaboración propia

Figura 10.

Colocación de cuartos opuestos en cono sobre superficie dura y limpia y segundo cuarteo.



Nota: Elaboración propia

Figura 11.

Colocación de cuartos opuestos en cono sobre superficie dura y limpia y tercer cuarteo. Se escoge uno de los cuartos como muestra para análisis granulométrico.



Nota: Elaboración propia

Figura 12.

Colocación de muestra de agregado fino en horno



Nota: Elaboración propia

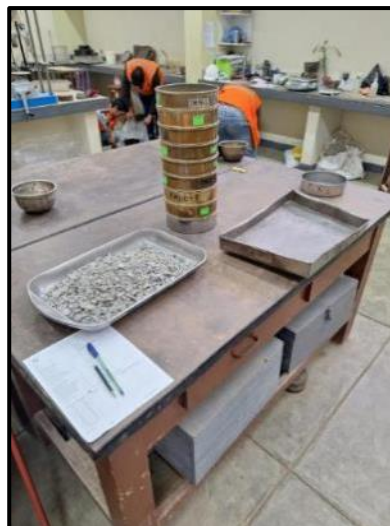
3.1.3 Análisis granulométrico de agregado grueso y fino

Obtenida la muestra de los agregados fino y grueso se procede a realizar el tamizado para obtener los pesos retenidos por los tamices de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°10, N°40, N°80 y N°200, posteriormente se utilizará estos pesos retenidos para obtener la mezcla de agregados y que cumpla con el huso granulométrico MAC – 2.

Agregado grueso

Figura 13.

Muestra de agregado grueso y tamices a utilizar



Nota: Elaboración propia

Figura 14.

Tamizado de agregado grueso por malla $\frac{1}{2}$ "



Nota: Elaboración propia

Figura 15.

Tamizado de agregado grueso por malla $\frac{3}{8}$ "



Nota: Elaboración propia

Figura 16.

Tamizado de agregado grueso por malla N°4



Nota: Elaboración propia

Figura 17.

Tamizado de agregado grueso por malla N°200



Nota: Elaboración propia

Agregado fino

Figura 18.

Muestra de agregado fino para tamizado



Nota: Elaboración propia

Figura 19.

Tamizado de agregado fino por malla N°10



Nota: Elaboración propia

Figura 20.

Tamizado de agregado fino por malla N°40



Nota: Elaboración propia

Figura 21.

Tamizado de agregado fino por malla N°80



Nota: Elaboración propia

Figura 22.

Tamizado de agregado fino por malla N°200



Nota: Elaboración propia

3.1.4 Determinación de pesos específicos de agregados grueso y fino

Figura 23.

Cuarteo para obtener muestra de agregado grueso



Nota: Elaboración propia

Figura 24.

Saturado de la muestra de agregado grueso retenido por tamiz N°4 por 24 horas



Nota: Elaboración propia

Figura 25.

Saturado de la muestra de agregado fino por 24 horas



Nota: Elaboración propia

Figura 26.

Lavado con tamiz N°200 de la muestra de agregado fino



Nota: Elaboración propia

Figura 27.

Pesaje del agregado en agua



Nota: Elaboración propia

3.1.5 Selección de agregados grueso y fino para mezcla asfáltica

Se considera los porcentajes de participación del agregado grueso y del agregado fino que se obtuvieron en el análisis granulométrico de la mezcla de agregados para considerar una cantidad de agregado grueso y fino que se utilizará en la mezcla para todas las briquetas para la mezcla asfáltica patrón. Se utilizarán 5 bandejas para colocar en cada una de ellas agregado con un tamaño en específico, estas serán partículas retenidas por los tamices de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°10 y pasante.

Figura 28.

Cuarteo para obtener muestra más homogénea



Nota: Elaboración propia

Figura 29.

Cantidad de agregado grueso que se utilizará en la mezcla



Nota: Elaboración propia

Figura 30.

Tamizado por las mallas respectivas y obtención de los retenidos



Nota: Elaboración propia

Figura 31.

Cantidad de agregado fino que se utilizará en la mezcla



Nota: Elaboración propia

Figura 32.

Tamizado por las mallas respectivas y obtención de los retenidos



Nota: Elaboración propia

3.1.6 Preparación de los agregados para la mezcla asfáltica

Obtenido las cantidades retenidas por los tamices especificados en el procedimiento anterior, se realiza un cálculo de la cantidad de la mezcla de agregados que se usará para una briqueta de 1200 gramos, a continuación, se coloca en cada tara estas cantidades considerando los porcentajes retenidos obtenidos en el análisis granulométrico de la mezcla. Se consideró 3 taras para cada mezcla asfáltica con porcentaje de cemento asfáltico diferente y una tara para el ensayo RICE de cada una de estas.

Figura 33.

Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de 1/2"



Nota: Elaboración propia

Figura 34.

Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de 3/8"



Nota: Elaboración propia

Figura 35.

Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de N°4



Nota: Elaboración propia

Figura 36.

Colocación en tara de agregado retenido por tamiz de N°10



Nota: Elaboración propia

Figura 37.

Colocación en tara de agregado pasante de tamiz N°10



Nota: Elaboración propia

Figura 38.

Colocación de las taras al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$



Nota: Elaboración propia

3.1.7 Preparación de las mezclas asfálticas y briquetas para especímenes de mezcla asfáltica patrón

Obtenido las taras con la mezcla de agregados, se procede a calentar el cemento asfáltico PEN 60/70 para mezclarlo con los agregados en sus respectivas taras al porcentaje en peso requerido. Debido a que el mezclado es manual, este se realiza sobre una hornilla para mantener la temperatura de mezclado durante 1 minuto para que la mezcla sea homogénea. Después se colocan las taras al horno a una temperatura de $145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora para iniciar la compactación de los especímenes.

La compactación de los especímenes se realizará con un martillo de compactación. Se colocará las mezclas en los moldes de briquetas y se compactará dando 75 golpes por cara. Se dejó en sus moldes hasta el día siguiente para desmoldarlas con la ayuda de una gata hidráulica.

Figura 39.

Calentamiento de cemento asfáltico PEN 60/70



Nota: Elaboración propia

Figura 40.

Adición de cemento asfáltico PEN 60/70 a la tara de mezcla de agregados



Nota: Elaboración propia

Figura 41.

Mezclado manual de cemento asfáltico y agregados



Nota: Elaboración propia

Figura 42.

Colocación de mezclas asfálticas sueltas al horno a $145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$



Nota: Elaboración propia

Figura 43.

Compactación de las mezclas asfálticas



Nota: Elaboración propia

Figura 44.*Briquetas de mezclas asfálticas en moldes*

Nota: Elaboración propia

Figura 45.*Desmoldado de briquetas con gata hidráulica*

Nota: Elaboración propia

3.1.8 Medición de briquetas, ensayo de gravedad específica máxima teórica y ensayo de estabilidad y flujo Marshall de especímenes de mezcla asfáltica patrón

Desmoldado las briquetas se procede a realizar la medición de diámetros y alturas de las briquetas con un vernier, asimismo, se pesa los especímenes secos en aire, saturados superficialmente secos y sumergidos en agua, después se les sumerge en un baño maría a 60°C para luego ensayarlos en la máquina de cargas de Marshall.

Para el ensayo de gravedad específica máxima teórica se pesa la mezcla asfáltica suelta seca en aire, se pesa el recipiente con agua y tapa temperado a 25°C y finalmente se pesa el recipiente con tapa, la muestra y agua a 25°C quitándole los vacíos con una bomba.

Figura 46.

Medición de dimensiones y pesado de briquetas



Nota: Elaboración propia

Figura 47.

Pesaje de los especímenes superficialmente secos y sumergidos en agua



Nota: Elaboración propia

Figura 48.

Inmersión de briquetas en baño maría a 60°C



Nota: Elaboración propia

Figura 49.

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional



Nota: Elaboración propia

Figura 50.

Muestra suelta de mezcla asfáltica convencional seca al aire y pesado de esta



Nota: Elaboración propia

Figura 51.

Extracción de vacíos con bomba de vacíos a muestra suelta



Nota: Elaboración propia

Figura 52.

Temperado de recipiente con muestra y pesado de estos



Nota: Elaboración propia

3.1.9 Preparación de las mezclas asfálticas y briquetas para especímenes de mezcla asfáltica con PET

Obtenido las cantidades retenidas por los tamices especificados en el procedimiento anterior, se realiza un cálculo de la cantidad de la mezcla de agregados que se usará para una briketa de 1200 gramos, a continuación, se coloca en cada tara estas cantidades considerando los porcentajes retenidos obtenidos en el análisis granulométrico de la mezcla. Se consideró 3 taras para cada mezcla asfáltica con porcentaje de cemento asfáltico diferente y una tara para el ensayo RICE de cada una de estas. Asimismo, de acuerdo al método húmedo se añade el plástico PET al cemento asfáltico para luego mezclar con los agregados en las taras respectivas.

Figura 53.

Adición de plástico PET al cemento asfáltico según método húmedo



Nota: Elaboración propia

Figura 54.

Mezclado de cemento asfáltico con PET con los agregados y puesta en horno



Nota: Elaboración propia

Figura 55.

Compactación de las mezclas asfálticas con martillo de compactación en moldes



Nota: Elaboración propia

Figura 56.

Desmoldado de briquetas con gato hidráulico



Nota: Elaboración propia

3.1.10 Medición de briquetas, ensayo de gravedad específica máxima teórica y ensayo de estabilidad y flujo Marshall de especímenes de mezcla asfáltica con PET

Desmoldado los especímenes se procede a realizar la medición de dimensiones de las briquetas con un vernier, asimismo, se pesa los especímenes secos en aire, saturados superficialmente secos y sumergidos en agua, después se les sumerge en un baño maría a 60°C para luego ensayarlos en la máquina de cargas de Marshall. Se realiza el procedimiento similar a los especímenes para la mezcla asfáltica patrón.

Figura 57.

Medición de diámetros y alturas de los especímenes con vernier



Nota: Elaboración propia

Figura 58.

Pesaje de espécimen seco al aire



Nota: Elaboración propia

Figura 59.

Pesaje de espécimen sumergido en agua y saturado superficialmente



Nota: Elaboración propia

Figura 60.

Inmersión de especímenes con PET en baño maría a 60°C



Nota: Elaboración propia

Figura 61.

Ensayo con máquina de carga Marshall de especímenes con PET



Nota: Elaboración propia

Para el ensayo de gravedad específica máxima teórica (RICE) se utilizó el método húmedo el cual consiste en mezclar el PET con el ligante asfáltico y así obtener una mezcla homogénea. A continuación, se pesa la mezcla asfáltica suelta y seca en aire, luego se pesa el recipiente con agua y tapa a una temperatura de 25°C, y finalmente se pesa el recipiente con la tapa, la muestra y el agua a 25°C, eliminando los vacíos con una bomba.

Figura 62.

Muestra suelta de mezcla asfáltica seca al aire



Nota: Elaboración propia

Figura 63.

Extracción de vacíos con bomba



Nota: Elaboración propia

Figura 64.

Pesado de recipiente con muestra



Nota: Elaboración propia

3.2 Resultados

3.2.1 Análisis granulométrico

Tabla 19.

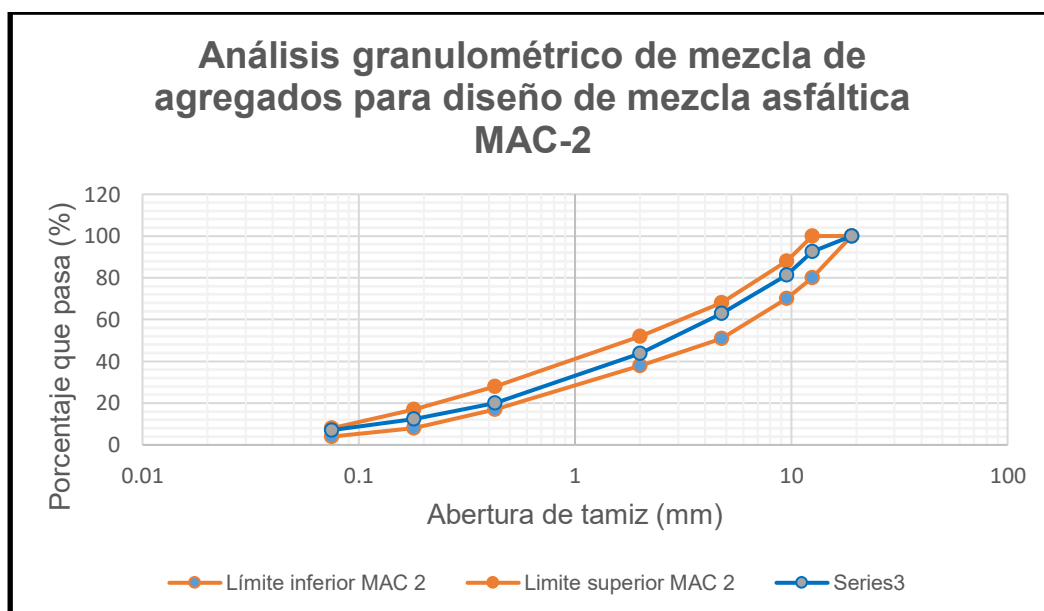
Análisis granulométrico de mezcla de agregados

Tamiz Abert. (mm)	Peso retenido (g)		Porcentaje retenido (%)		Porcentaje retenido acumulado (%)		Porcentaje acumulado que pasa (%)		% que pasa MEZCLA		Retenido	MAC 2	
	Ag. grueso	Ag. fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino		Lim. Inf.	Lim. Sup.
									36.00%	64.00%			
3/4"	19						100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	12.5	1172	20.93		20.93		79.07	100.00	92.47		7.53	80	100
3/8"	9.5	1746	31.18		52.11		47.89	100.00	81.24		11.22	70	88
Nº4	4.75	2319	81	41.41	5.52	5.52	6.48	94.48	62.80		18.44	51	68
Nº10	2	342	383.2	6.11	26.12	99.63	31.64	0.38	68.36	43.88	18.92	38	52
Nº40	0.425	8	545.6	0.14	37.19	99.77	68.83	0.23	31.17	20.03	23.85	17	28
Nº80	0.18	1	174.7	0.02	11.91	99.79	80.74	0.21	19.26	12.40	7.63	8	17
Nº200	0.075	3	121.6	0.05	8.29	99.84	89.03	0.16	10.97	7.08	5.32	4	8
Platillo	0	9	160.9	0.16	10.97	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	7.08	0	0
		5600	1467								100.00		

Nota: Elaboración propia

Figura 65.

Gráfica de análisis granulométrico de mezcla de agregados para diseño de mezcla asfáltica MAC – 2



Nota: Elaboración propia

3.2.2 Gravedad específica y absorción de agregados

Tabla 20.

Gravedad específica y absorción de agregado grueso

AGREGADO GRUESO (ASTM C127/MTC E206)		
A	PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AIRE)	(gr) 1370.2
B	PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AGUA)	(gr) 857.3

C VOL. DE MASA + VOL. DE VACIOS = A-B	(gr)	512.8
D PESO MAT. SECO EN ESTUFA (105°C)	(gr)	1359.4
E VOL. DE MASA = C-(A-D)		502
P.E. BULK (BASE SECA) = D/C		2.651
P.E. BULK (BASE SATURADA) = A/C		2.672
P.E. APARENTE (BASE SECA) = D/E		2.708
% DE ABSORCION = ((A-D)/D)x100		0.794

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 21.

Gravedad específica y absorción de agregado fino

AGREGADO FINO (ASTM C128/MTC E205)		
A PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AIRE)	(gr)	500.72
B PESO FRASCO + H ₂ O	(gr)	670.24
C PESO FRASCO + H ₂ O + A	(gr)	1170.96
D PESO DEL MAT. + H ₂ O EN EL FRASCO	(gr)	984.69
E VOL. DE MASA + VOL. DE VACIO = C-D		186.27
F PESO MAT. SECO EN ESTUFA (105°C)		495.58
G VOL. DE MASA = E-(A-F)		181.13
P.E. BULK (BASE SECA) = F/E		2.661
P.E. BULK (BASE SATURADA) = A/E		2.688
P.E. APARENTE (BASE SECA) = F/G		2.736
% DE ABSORCION = ((A-F)/F)x100		1.037

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.3 Medición de muestras de mezcla asfáltica convencional

Tabla 22.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.185	10.22	10.185
DIAMETRO 2	(cm)	10.18	10.155	10.195
PROMEDIO	(cm)	10.183	10.188	10.19
ESPESOR 1	(cm)	6.6	6.64	6.575
ESPESOR 2	(cm)	6.59	6.58	6.65

ESPESOR 3	(cm)	6.53	6.61	6.61
ESPESOR 4	(cm)	6.54	6.725	6.555
PROMEDIO	(cm)	6.565	6.639	6.598
MASA TESTIGO (g)		1195.1	1194.8	1193.4

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 23.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.22	10.185	10.195
DIAMETRO 2	(cm)	10.21	10.165	10.18
PROMEDIO	(cm)	10.215	10.175	10.188
ESPESOR 1	(cm)	6.55	6.475	6.485
ESPESOR 2	(cm)	6.485	6.475	6.5
ESPESOR 3	(cm)	6.435	6.55	6.46
ESPESOR 4	(cm)	6.445	6.52	6.44
PROMEDIO	(cm)	6.479	6.505	6.471
MASA TESTIGO (g)		1192.9	1192.4	1194.2

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 24.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.185	10.195	10.17
DIAMETRO 2	(cm)	10.175	10.185	10.155
PROMEDIO	(cm)	10.18	10.19	10.163
ESPESOR 1	(cm)	6.415	6.425	6.505
ESPESOR 2	(cm)	6.46	6.445	6.5
ESPESOR 3	(cm)	6.415	6.44	6.415
ESPESOR 4	(cm)	6.41	6.395	6.42
PROMEDIO	(cm)	6.425	6.426	6.46
MASA TESTIGO (g)		1194.3	1193.5	1193.5

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 25.*Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico*

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.175	10.175	10.195
DIAMETRO 2	(cm)	10.16	10.165	10.19
PROMEDIO	(cm)	10.168	10.17	10.193
ESPESOR 1	(cm)	6.39	6.45	6.355
ESPESOR 2	(cm)	6.375	6.46	6.36
ESPESOR 3	(cm)	6.395	6.41	6.415
ESPESOR 4	(cm)	6.425	6.395	6.435
PROMEDIO	(cm)	6.396	6.429	6.391
MASA TESTIGO (g)		1191.7	1194.5	1193.5

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 26.*Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico*

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.16	10.18	10.185
DIAMETRO 2	(cm)	10.16	10.195	10.175
PROMEDIO	(cm)	10.16	10.188	10.18
ESPESOR 1	(cm)	6.48	6.39	6.51
ESPESOR 2	(cm)	6.415	6.39	6.57
ESPESOR 3	(cm)	6.4	6.435	6.52
ESPESOR 4	(cm)	6.465	6.46	6.485
PROMEDIO	(cm)	6.44	6.419	6.521
MASA TESTIGO (g)		1195.6	1196.8	1196.3

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.4 Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional

Tabla 27.*Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico*

ESPÉCIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1195.1	1194.8	1193.4
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	1198.5	1198.7	1198.4

Masa del espécimen sumergido en agua, g	674.5	671.4	671.2
Espesor, mm	65.65	66.39	65.98
Estabilidad Marshall	1698.174	1742.174	1744.174
Flujo Marshall (0.25mm)	3.924	3.694	3.704
Temperatura de Ensayo, °C	15.9	15.9	15.9

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 28.

Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico

ESPÉCIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1192.9	1192.4	1194.2
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	1196	1194.2	1196.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	675.8	675.1	678
Espesor, mm	64.79	65.05	64.71
Estabilidad Marshall	1513.641	1557.641	1559.641
Flujo Marshall (0.25mm)	3.976	3.746	3.756
Temperatura de Ensayo, °C	15.9	15.9	15.9

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 29.

Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico

ESPÉCIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1194.3	1193.5	1193.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	1195.2	1194.4	1195.9
Masa del espécimen sumergido en agua, g	680.2	678.5	680.9
Espesor, mm	64.25	64.26	64.6
Estabilidad Marshall	1469.599	1513.599	1515.599
Flujo Marshall (0.25mm)	4.123	3.893	3.903
Temperatura de Ensayo, °C	16.1	16.1	16.1

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 30.

Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico

ESPÉCIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1191.7	1194.5	1193.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	1192.3	1195	1194

Masa del espécimen sumergido en agua, g	679.6	681.2	681.8
Espesor, mm	63.96	64.29	63.91
Estabilidad Marshall	1362.12	1406.12	1408.12
Flujo Marshall (0.25mm)	4.59	4.36	4.37
Temperatura de Ensayo, °C	16.1	16.2	16.2

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 31.

Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico

ESPÉCIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1195.6	1196.8	1196.3
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	1196.8	1197.6	1198.1
Masa del espécimen sumergido en agua, g	682.2	683.3	683.2
Espesor, mm	64.4	64.19	65.21
Estabilidad Marshall	1473.67	1739.47	1467.456
Flujo Marshall (0.25mm)	3.991	4.418	4.101
Temperatura de Ensayo, °C	15.3	15.3	15.3

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.5 Gravedad específica máxima teórica (RICE) de mezcla asfáltica convencional

Tabla 32.

Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 5% de cemento asfáltico

Espécimen N°	1
1 Masa de la muestra seca en aire	A 1501
2 Temperatura del agua, °C	25
3 Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D 7414
4 Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E 8316
5 Gravedad específica máxima, Gmm	A/(A+D-E) 2.506

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 33.

Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 5.5% de cemento asfáltico

Espécimen N°	2
--------------	---

1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8310
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.486

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 34.

Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6% de cemento asfáltico

Espécimen N°			3
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1500
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8295
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.423

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 35.

Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6.5% de cemento asfáltico

Espécimen N°			1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8287
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.395

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 36.

Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6.1% de cemento asfáltico

Espécimen N°			1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25

3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8294
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.422

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.6 Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional

Tabla 37.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 5% de cemento asfáltico

N° BRIQUETA		1		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5	5	5
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	34.20	34.20	34.20
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.80	60.80	60.80
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.565	6.639	6.598
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1195.1	1194.8	1193.4
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1198.5	1198.7	1198.4
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	674.5	671.4	671.2
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	524	527.3	527.2
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.281	2.266	2.264
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.506	2.506	2.506
14	% VACIOS $(12/13)*100$ (13-	8.978	9.577	9.657
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL $(2+3)/(2/5+3/6)$	2.657	2.657	2.657
16	V.M.A. $((2+3)*(12/15))$ 1-	18.44	18.98	19.05
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. $(100*(16-14))/16$	51.323	49.542	49.312
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL $(2+3)/((100/13)-(1/4))$	2.706	2.706	2.706

20	% ASFALTO EFECTIVO ($19 * ((2+3)/100)$)	1-	0.326	0.326	0.326
21	FLUJO (mm)		3.924	3.694	3.704
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)		1698.174	1742.174	1744.174
23	FACTOR DE ESTABILIDAD		0.96	0.96	0.96
24	ESTABILIDAD CORREGIDA ($22 * 23$) (Kg)		1630.247	1672.487	1674.407

Nota: Elaboración propia

Tabla 38.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 5.5% de cemento asfáltico

N° BRIQUETA		2		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5.5	5.5	5.5
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	34.02	34.02	34.02
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.48	60.48	60.48
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.479	6.505	6.471
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1192.9	1192.4	1194.2
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1196	1194.2	1196.4
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	675.8	675.1	678
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	520.2	519.1	518.4
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.293	2.297	2.304
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.486	2.486	2.486
14	% VACIOS (13-12)/13)*100	7.763	7.603	7.321
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (2+3)/(2/5+3/6)	2.657	2.657	2.657
16	V.M.A. (2+3)*(12/15)) 1-	18.45	18.30	18.06
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	57.915	58.463	59.452

18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (2+3)/((100/13)-(1/4))		2.704	2.704	2.704
20	% ASFALTO EFECTIVO (19*((2+3)/100))	1-	0.356	0.356	0.356
21	FLUJO (mm)		3.976	3.746	3.756
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)		1513.641	1557.641	1559.641
23	FACTOR DE ESTABILIDAD		1	1	1
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)		1513.641	1557.641	1559.641

Nota: Elaboración propia

Tabla 39.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6% de cemento asfáltico

N° BRIQUETA		3		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	6	6	6
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.84	33.84	33.84
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.16	60.16	60.16
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.425	6.426	6.46
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1194.3	1193.5	1193.5
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1195.2	1194.4	1195.9
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	680.2	678.5	680.9
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	515	515.9	515
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.319	2.313	2.317
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.423	2.423	2.423
14	% VACIOS (12)/13)*100 (13-	4.292	4.54	4.375
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (2+3)/(2/5+3/6)	2.657	2.657	2.657
16	V.M.A. ((2+3)*(12/15)) 1-	17.96	18.17	18.03

17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	76.1	75.014	75.734
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (2+3)/((100/13)-(1/4))	2.647	2.647	2.647
20	% ASFALTO EFECTIVO (19*((2+3)/100))	1.139	1.139	1.139
21	FLUJO (mm)	4.123	3.893	3.903
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)	1469.599	1513.599	1515.599
23	FACTOR DE ESTABILIDAD	1	1	1
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)	1469.599	1513.599	1515.599

Nota: Elaboración propia

Tabla 40.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6.5% de cemento asfáltico

N° BRIQUETA		4		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	6.5	6.5	6.5
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.66	33.66	33.66
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	59.84	59.84	59.84
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.396	6.429	6.391
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1191.7	1194.5	1193.5
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1192.3	1195	1194
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	679.6	681.2	681.8
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	512.7	513.8	512.2
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.324	2.325	2.33
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.395	2.395	2.395
14	% VACIOS (12/13)*100	2.965	2.923	2.714
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (2+3)/(2/5+3/6)	2.657	2.657	2.657

16	V.M.A. ((2+3)*(12/15))	1-	18.22	18.18	18.01
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	(100*(16-14))/16	83.725	83.925	84.928
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (2+3)/((100/13)-(1/4))		2.633	2.633	2.633
20	% ASFALTO EFECTIVO (19*((2+3)/100))	1-	1.334	1.334	1.334
21	FLUJO (mm)		4.59	4.36	4.37
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)		1362.12	1406.12	1408.12
23	FACTOR DE ESTABILIDAD		1	1	1
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)		1362.12	1406.12	1408.12

Nota: Elaboración propia

Tabla 41.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional con 6.1% de cemento asfáltico

N° BRIQUETA		5		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	6.1	6.1	6.1
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.80	33.80	33.80
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.10	60.10	60.10
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.44	6.419	6.521
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1195.6	1196.8	1196.3
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1196.8	1197.6	1198.1
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	682.2	683.3	683.2
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	514.6	514.3	514.9
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.323	2.327	2.323
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.422	2.422	2.422
14	% VACIOS (13-12)/13)*100	4.088	3.922	4.088

15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (2+3)/(2/5+3/6)		2.657	2.657	2.657
16	V.M.A. ((2+3)*(12/15))	1-	17.90	17.76	17.90
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	(100*(16-14))/16	77.167	77.919	77.167
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (2+3)/((100/13)-(1/4))		2.65	2.65	2.65
20	% ASFALTO EFECTIVO (19*((2+3)/100))	1-	1.097	1.097	1.097
21	FLUJO (mm)		3.991	4.418	4.101
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)		1473.67	1739.47	1467.456
23	FACTOR DE ESTABILIDAD		1	1	1
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)		1473.67	1739.47	1467.456

Nota: Elaboración propia

Tabla 42.

Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica convencional

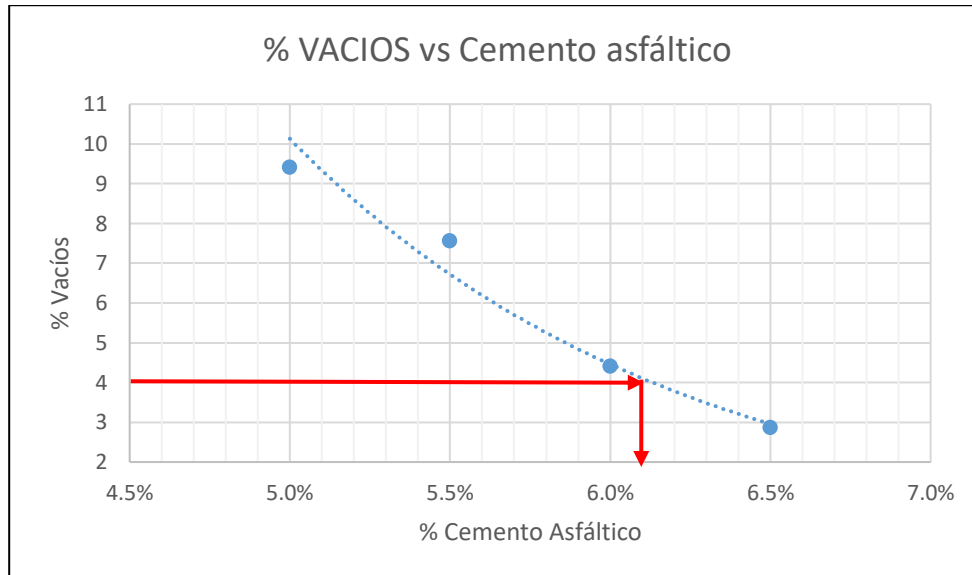
Cemento asfáltico	%vacíos	Estabilidad (kgf)	Flujo(mm)	VMA(%)	VFA(%)	Peso específico (g/cm3)
5.0%	9.404	1659.047	3.774	18.83	50.06	2.27
5.5%	7.562	1543.641	3.826	18.27	58.61	2.30
6.0%	4.402	1499.599	3.973	18.05	75.62	2.32
6.5%	2.867	1392.12	4.44	18.14	84.19	2.33
6.1%	4.033	1470.563	4.17	17.86	77.42	2.32

Nota: Elaboración propia

De los ensayos de laboratorio para encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se obtiene de las gráficas de los parámetros de diseño Marshall el porcentaje óptimo de cemento asfáltico cuyo valor es 6.1% para un porcentaje de vacíos de 4.033%. Para dicho porcentaje de cemento asfáltico también se realizó los ensayos correspondientes y obtener sus parámetros reales.

Figura 66.

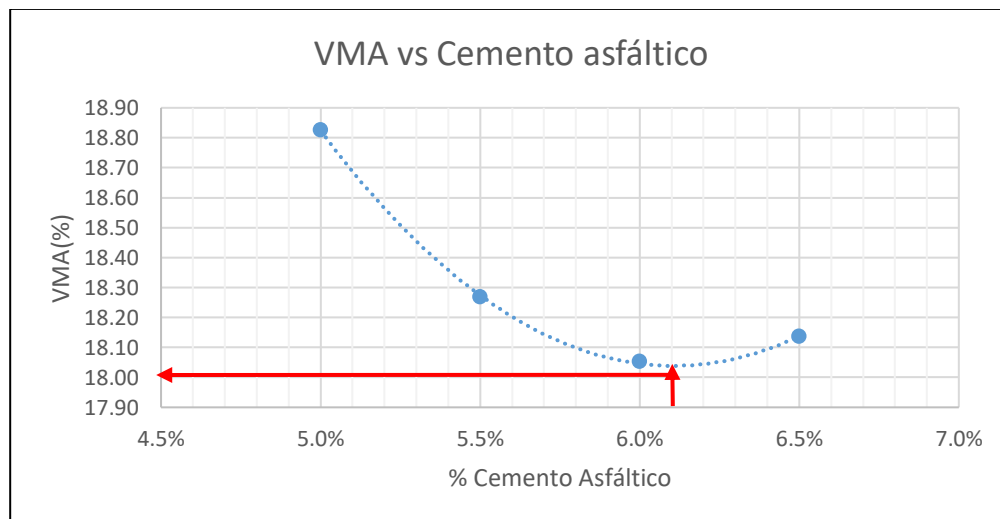
Porcentaje de vacíos vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional



Nota: Elaboración propia

Figura 67.

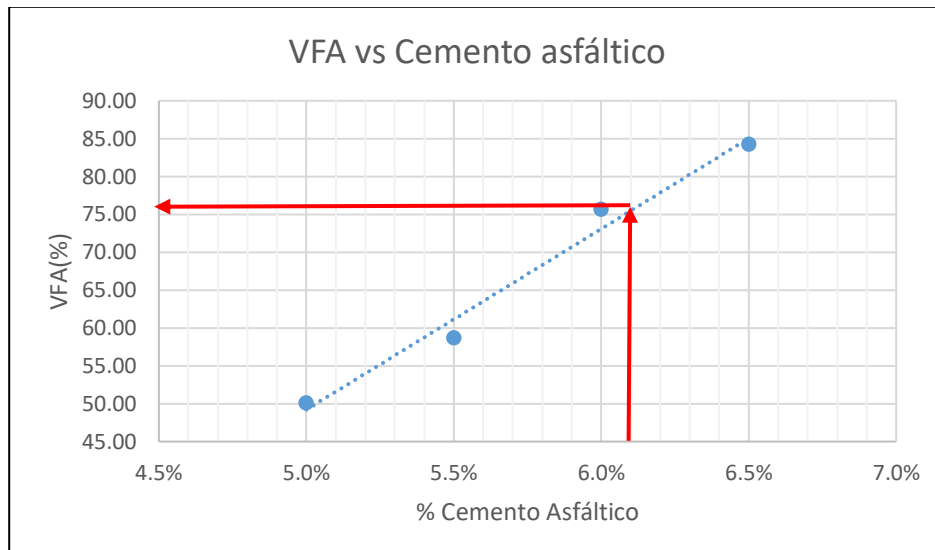
Volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional



Nota: Elaboración propia

Figura 68.

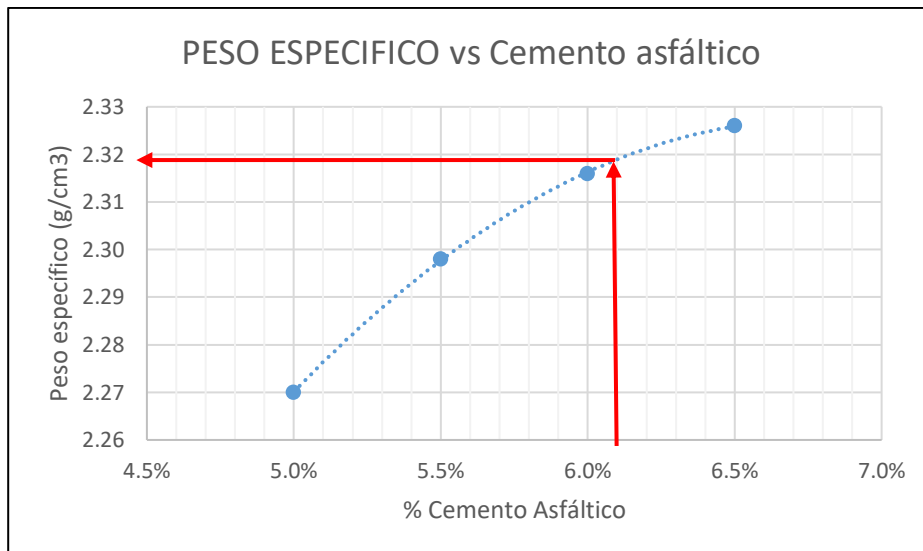
Volumen de vacíos llenos con asfalto efectivo (VFA) vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional



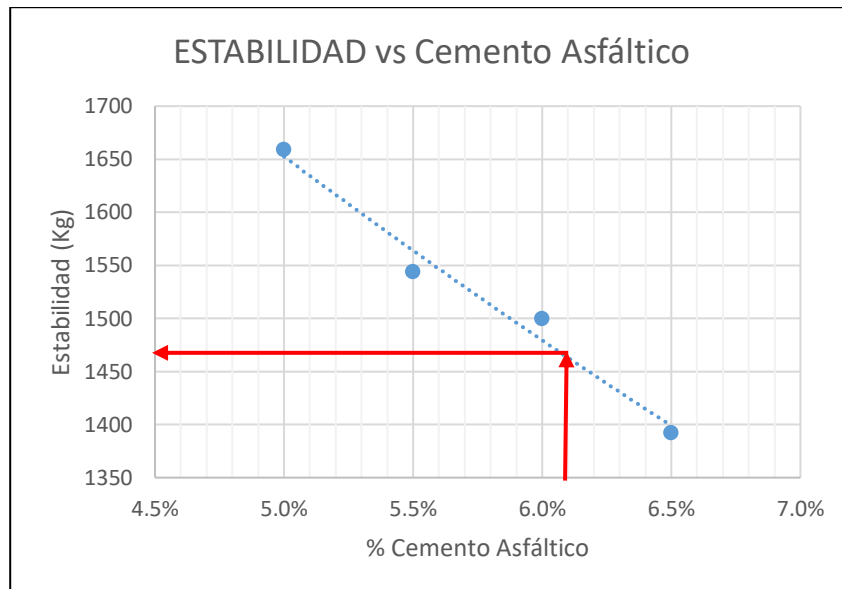
Nota: Elaboración propia

Figura 69.

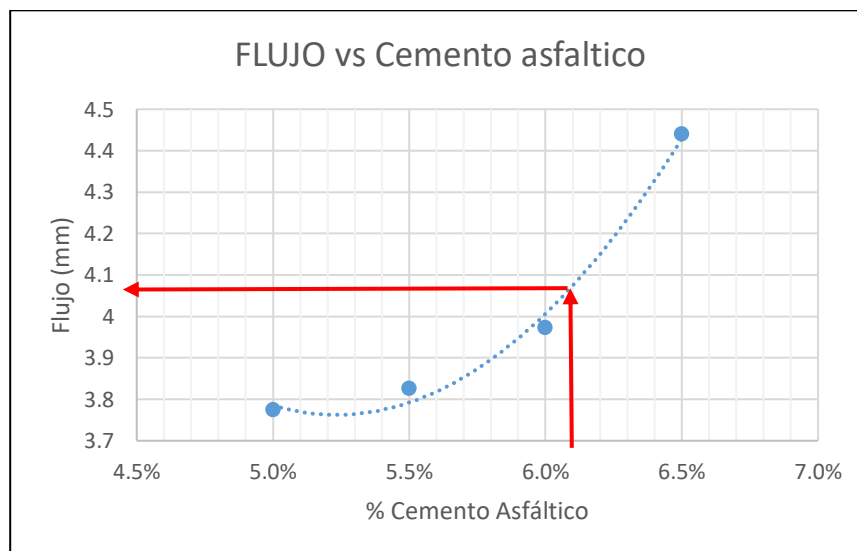
Peso específico vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional



Nota: Elaboración propia

Figura 70.*Estabilidad vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional*

Nota: Elaboración propia

Figura 71.*Flujo vs cemento asfáltico de mezcla asfáltica convencional*

Nota: Elaboración propia

3.2.7 Medición de muestras de mezcla asfáltica con incorporación de PET**Tabla 43.***Medición de muestras de mezcla asfáltica con 2% de PET*

TESTIGOS	1	2	3	
DIAMETRO 1	(cm)	10.205	10.18	10.195

DIAMETRO 2	(cm)	10.21	10.175	10.21
PROMEDIO	(cm)	10.208	10.178	10.203
ESPESOR 1	(cm)	6.44	6.46	6.51
ESPESOR 2	(cm)	6.5	6.51	6.485
ESPESOR 3	(cm)	6.48	6.54	6.47
ESPESOR 4	(cm)	6.435	6.435	6.48
PROMEDIO	(cm)	6.464	6.486	6.486
MASA TESTIGO (g)		1195.9	1194.7	1195.1

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 44.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 4% de PET

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.17	10.18	10.17
DIAMETRO 2	(cm)	10.175	10.185	10.175
PROMEDIO	(cm)	10.173	10.183	10.173
ESPESOR 1	(cm)	6.44	6.55	6.52
ESPESOR 2	(cm)	6.435	6.54	6.52
ESPESOR 3	(cm)	6.475	6.5	6.46
ESPESOR 4	(cm)	6.485	6.51	6.455
PROMEDIO	(cm)	6.459	6.525	6.489
MASA TESTIGO (g)		1195.1	1195.5	1195.3

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 45.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 6% de PET

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.22	10.17	10.22
DIAMETRO 2	(cm)	10.215	10.165	10.22
PROMEDIO	(cm)	10.218	10.168	10.22
ESPESOR 1	(cm)	6.4	6.635	6.485
ESPESOR 2	(cm)	6.49	6.59	6.49
ESPESOR 3	(cm)	6.47	6.6	6.52
ESPESOR 4	(cm)	6.415	6.64	6.54

PROMEDIO	(cm)	6.444	6.616	6.509
MASA TESTIGO (g)		1194.8	1195.7	1195.5

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 46.

Medición de muestras de mezcla asfáltica con 8% de PET

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.17	10.18	10.19
DIAMETRO 2	(cm)	10.175	10.17	10.16
PROMEDIO	(cm)	10.173	10.175	10.175
ESPESOR 1	(cm)	6.6	6.625	6.685
ESPESOR 2	(cm)	6.67	6.58	6.635
ESPESOR 3	(cm)	6.635	6.55	6.61
ESPESOR 4	(cm)	6.585	6.59	6.655
PROMEDIO	(cm)	6.623	6.586	6.646
MASA TESTIGO (g)		1195.7	1195.9	1196.7

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.8 Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Tabla 47.

Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.9	1194.7	1195.1
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1197.5	1196.4	1197.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	677.8	677.6	679.8
Espesor, mm		64.64	64.86	64.86
Estabilidad Marshall (kg)		1428.804	1636.916	1468.068
Temperatura de Ensayo, °C		15.3	15.3	15.3

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 48.*Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET*

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.1	1195.5	1195.3
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1196.7	1198.1	1197.1
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	680.6	680.1	678.8
Espesor, mm		64.59	65.25	64.89
Estabilidad Marshall (kg)		1673.912	1720.315	1646.523
Temperatura de Ensayo, °C		15.4	15.4	15.4

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 49.*Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET*

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1194.8	1195.7	1195.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1197.6	1198.2	1198.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	678.4	670.6	674.1
Espesor, mm		64.44	66.16	65.09
Estabilidad Marshall (kg)		1672.031	1518.625	1465.15
Temperatura de Ensayo, °C		15.7	15.7	15.7

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 50.*Estabilidad Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET*

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.7	1195.9	1196.7
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1198.7	1198.9	1199.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	670.8	672	669.3
Espesor, mm		66.23	65.86	66.46
Estabilidad Marshall (kg)		1361.034	1530.599	1394.567
Temperatura de Ensayo, °C		16.1	15.7	15.7

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.9 Gravedad específica máxima teórica (RICE) de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Tabla 51.*Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 2% de PET*

Espécimen N°		1
1 Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2 Temperatura del agua, °C		25
3 Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4 Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8294
5 Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.422

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 52.*Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 4% de PET*

Espécimen N°		1
1 Masa de la muestra seca en aire	A	1501
2 Temperatura del agua, °C		25
3 Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4 Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E	8301
5 Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.445

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 53.*Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 6% de PET*

Espécimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A 1500
0	Temperatura del agua, °C	25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D 7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E 8306
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$ 2.467

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 54.*Gravedad específica máxima teórica de mezcla asfáltica con 8% de PET*

Espécimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A 1500
2	Temperatura del agua, °C	25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D 7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C, g	E 8307
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$ 2.471

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

3.2.10 Diseño Marshall de mezcla con incorporación de PET

Tabla 55.*Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET*

N° BRIQUETA	1		
1 % C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5.978	5.978	5.978
1.1 % PET EN PESO DE LA MEZCLA	0.122	0.122	0.122
2 % A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.80	33.80	33.80
3 % A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.10	60.10	60.10
4 P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
4.1 P.E. DEL PET	1.365	1.365	1.365
5 P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6 P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661

7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.464	6.486	6.486
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1195.9	1194.7	1195.1
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1197.5	1196.4	1197.7
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	677.8	677.6	679.8
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	519.7	518.8	517.9
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.301	2.303	2.308
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.422	2.422	2.422
14	% VACIOS (13-12)/13)*100	4.996	4.913	4.707
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (1.1+2+3)/(1.1/4.1+2/5+3/6)	2.654	2.654	2.654
16	V.M.A. ((2+3)*(12/15)) 1-	18.59	18.52	18.34
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	73.124	73.47	74.338
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (1.1+2+3)/((100/13)-(1/4))	2.645	2.645	2.645
20	% ASFALTO EFECTIVO (19*((2+3)/100)) 1-	1.125	1.125	1.125
21	FLUJO (mm)	4.286	4.237	3.851
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)	1428.804	1636.916	1468.068
23	FACTOR DE ESTABILIDAD	0.96	0.96	0.96
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)	1371.652	1571.439	1409.345

Nota: Elaboración propia

Tabla 56.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET

N° BRIQUETA	2		
1 % C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5.856	5.856	5.856
1.1 % PET EN PESO DE LA MEZCLA	0.244	0.244	0.244
2 % A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.80	33.80	33.80
3 % A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.10	60.10	60.10

4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
4.1	P.E. DEL PET	1.365	1.365	1.365
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.459	6.525	6.489
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1195.1	1195.5	1195.3
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1196.7	1198.1	1197.1
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	680.6	680.1	678.8
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	516.1	518	518.3
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.316	2.308	2.306
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.445	2.445	2.445
14	% VACIOS $\frac{(12-13)}{13} \times 100$ (13-	5.276	5.603	5.685
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL $\frac{(1.1+2+3)}{(1.1/4.1+2/5+3/6)}$	2.651	2.651	2.651
16	V.M.A. $\frac{((2+3) \times (12/15))}{1-}$	17.97	18.25	18.32
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. $\frac{(100 \times (16-14))}{16}$	70.633	69.297	68.968
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL $\frac{(1.1+2+3)}{((100/13)-(1/4))}$	2.669	2.669	2.669
20	% ASFALTO EFECTIVO $\frac{(19 \times ((2+3)/100))}{1-}$	0.751	0.751	0.751
21	FLUJO (mm)	4.009	5.049	4.537
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)	1673.912	1720.315	1646.523
23	FACTOR DE ESTABILIDAD	1	1	1
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22×23) (Kg)	1673.912	1720.315	1646.523

Nota: Elaboración propia

Tabla 57.*Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET*

N° BRIQUETA		3		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5.734	5.734	5.734
1.1	% PET EN PESO DE LA MEZCLA	0.366	0.366	0.366
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.80	33.80	33.80
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.10	60.10	60.10
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
4.1	P.E. DEL PET	1.365	1.365	1.365
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.444	6.616	6.509
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1194.8	1195.7	1195.5
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1197.6	1198.2	1198.4
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	678.4	670.6	674.1
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	519.2	527.6	524.3
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.301	2.266	2.28
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.467	2.467	2.467
14	% VACIOS $(13-12)/13 \times 100$	6.729	8.148	7.58
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL $(1.1+2+3)/(1.1/4.1+2/5+3/6)$	2.648	2.648	2.648
16	V.M.A. $((2+3) \times (12/15))$	18.41	19.65	19.15
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. $(100 \times (16-14))/16$	63.439	58.526	60.418
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL $(1.1+2+3)/((100/13)-(1/4))$	2.691	2.691	2.691
20	% ASFALTO EFECTIVO $(19 \times ((2+3)/100))$	0.41	0.41	0.41
21	FLUJO (mm)	4.604	4.683	4.451
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)	1672.031	1518.625	1465.15

23	FACTOR DE ESTABILIDAD	1	0.96	0.96
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)	1672.031	1457.88	1406.544

Nota: Elaboración propia

Tabla 58.

Diseño Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET

N° BRIQUETA		4		
1	% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	5.612	5.612	5.612
1.1	% PET EN PESO DE LA MEZCLA	0.488	0.488	0.488
2	% A.G. EN PESO DE LA MEZCLA	33.80	33.80	33.80
3	% A.F. EN PESO DE LA MEZCLA	60.10	60.10	60.10
4	P.E. DEL CEMENTO ASFALTICO APARENTE	1.0	1.0	1.0
4.1	P.E. DEL PET	1.365	1.365	1.365
5	P.E. BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.651	2.651	2.651
6	P.E. BULK DEL AGREGADO FINO	2.661	2.661	2.661
7	ALTURA PROMEDIO DE LA BRIQUETA (cm)	6.623	6.586	6.646
8	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE (g)	1195.7	1195.9	1196.7
9	PESO DE LA BRIQUETA SATURADO SUPERFICIALMENTE SECA (g)	1198.7	1198.9	1199.7
10	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA (g)	670.8	672	669.3
11	VOLUMEN DE LA BRIQUETA (9-10) (cc)	527.9	526.9	530.4
12	P.E. BULK DE LA BRIQUETA (8/11) (g/cc)	2.265	2.27	2.256
13	PESO ESPECIFICO MAXIMO (Rice) (g/cc)	2.471	2.471	2.471
14	% VACIOS (13- 12)/13)*100	8.337	8.134	8.701
15	P.E. BULK DEL A. TOTAL (1.1+2+3)/(1.1/4.1+2/5+3/6)	2.644	2.644	2.644
16	V.M.A. 1- ((2+3)*(12/15))	19.56	19.38	19.88
17	% VACIOS LLENADOS CON C.A. V.F.A. (100*(16-14))/16	57.377	58.033	56.232
18	P.E. EFECTIVO DEL A. TOTAL (1.1+2+3)/((100/13)-(1/4))	2.691	2.691	2.691
20	% ASFALTO EFECTIVO 1- (19*((2+3)/100))	0.354	0.354	0.354

21	FLUJO (mm)	4.186	4.388	4.611
22	ESTABILIDAD SIN CORREGIR (Kg)	1361.034	1530.599	1394.567
23	FACTOR DE ESTABILIDAD	0.96	0.96	0.96
24	ESTABILIDAD CORREGIDA (22*23) (Kg)	1306.593	1469.375	1338.784

Nota: Elaboración propia

Tabla 59.

Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con PET

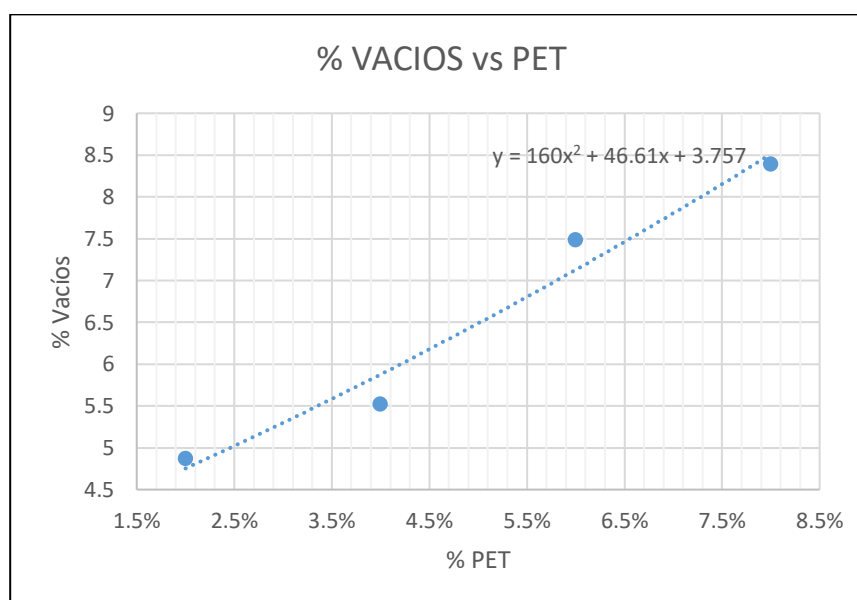
PET	%vacíos	Estabilidad (kgf)	VMA(%)	VFA(%)	Peso específico (g/cm3)
2.0%	4.872	1390.499	18.48	73.64	2.30
4.0%	5.521	1660.218	18.18	69.63	2.31
6.0%	7.486	1432.212	19.07	60.79	2.28
8.0%	8.391	1322.689	19.61	57.21	2.26

Nota: Elaboración propia

De la misma manera que la mezcla convencional, se realizan las gráficas con los parámetros de diseño Marshall obtenidos de los ensayos de laboratorio. Luego se estimará valores máximos de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para sus correspondientes contenidos de PET en la mezcla asfáltica.

Figura 72.

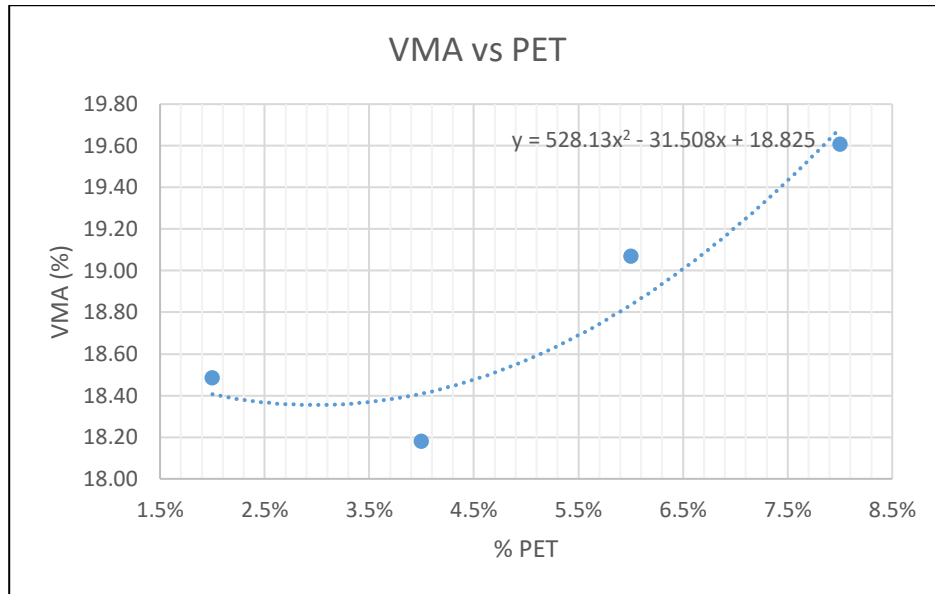
Porcentaje de vacíos vs porcentaje de PET



Nota: Elaboración propia

Figura 73.

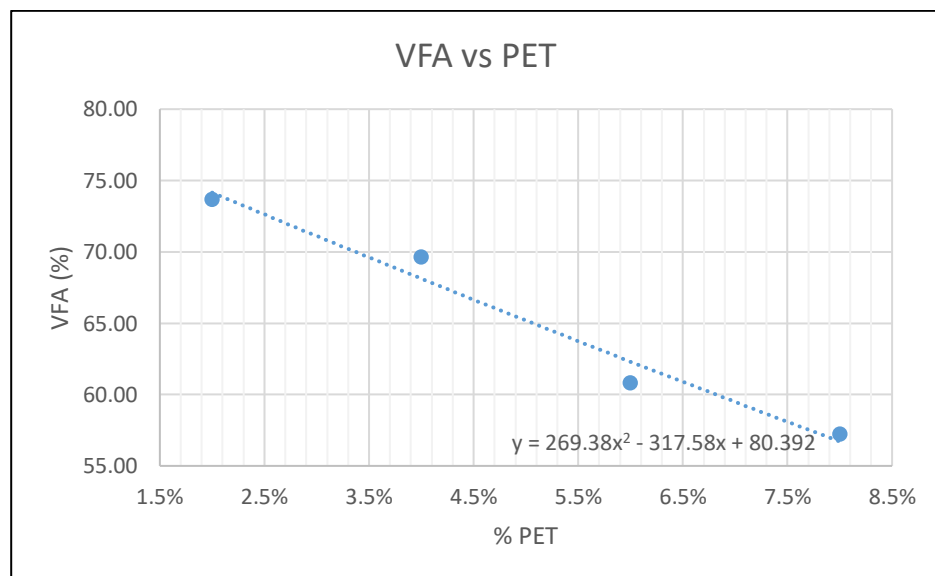
Volumen de vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de PET



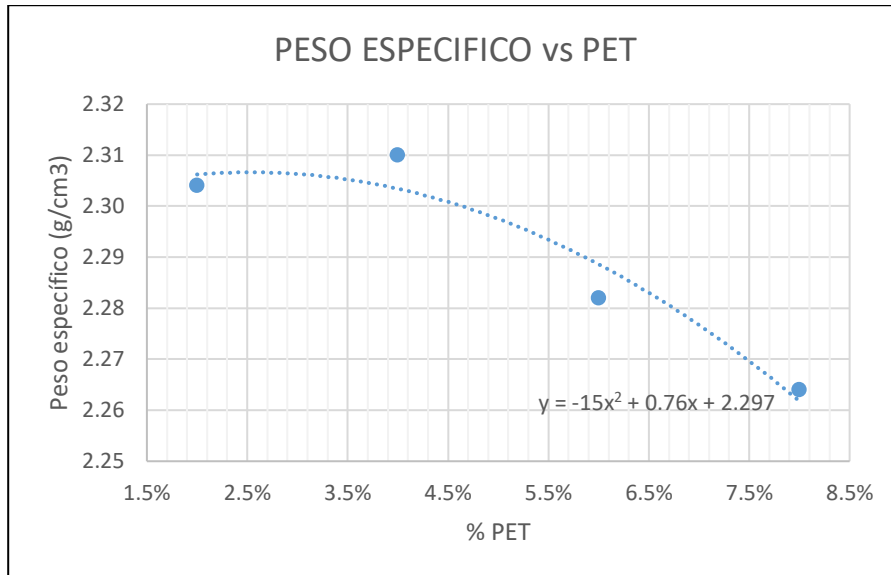
Nota: Elaboración propia

Figura 74.

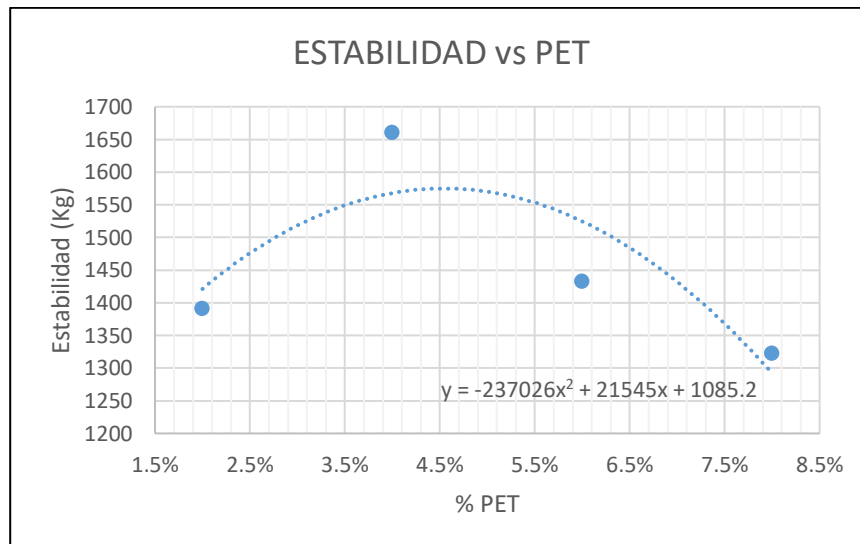
Volumen de vacíos llenos con asfalto efectivo vs porcentaje de PET



Nota: Elaboración propia

Figura 75.*Peso específico vs porcentaje de PET*

Nota: Elaboración propia

Figura 76.*Estabilidad vs porcentaje de PET*

Nota: Elaboración propia

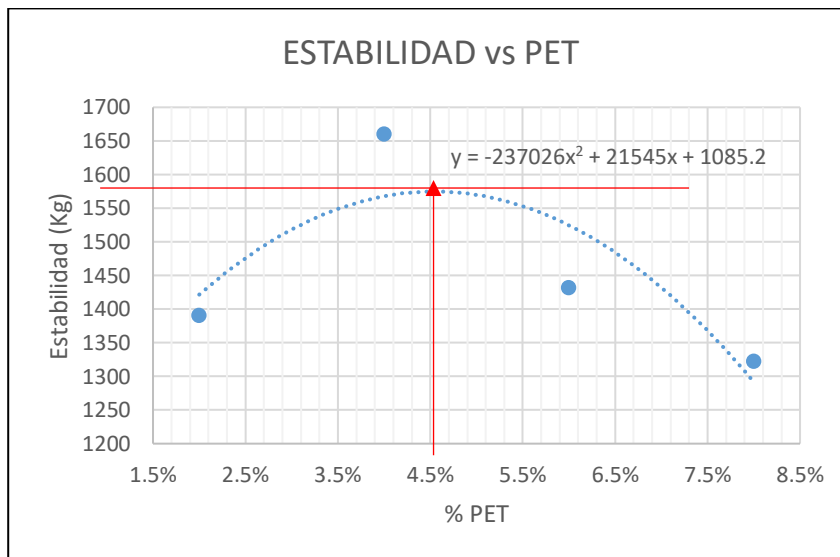
3.2.11 Estabilidad máxima de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Para calcular el porcentaje de PET que debe tener la mezcla asfáltica para obtener la mayor estabilidad se utilizó la ecuación de la curva de los especímenes ensayados. Se tiene que para la cantidad de PET en 4.54% el peso del cemento asfáltico la máxima

estabilidad es 1574.795 kg. Asimismo, se obtuvieron los otros parámetros de diseño Marshall.

Figura 77.

Estabilidad máxima de mezcla asfáltica con incorporación de PET



Nota: Elaboración propia

Tabla 60.

Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 4.54% de PET

ESTABILIDAD VS PET	
Estabilidad (kg)	1574.795
%PET	4.54%
Estabilidad'	0
%PET	0.0454
VACIOS VS PET	
% Vacíos	6.206
%PET	4.54%
FLUJO VS PET	
Flujo (mm)	4.565
%PET	4.54%
VMA (%)	18.48
VFA (%)	66.51
Peso Específico (g/cm3)	2.301

Nota: Elaboración propia

Tabla 61.

Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 4.54% de PET y mezcla asfáltica convencional

Parámetro Marshall	PET	%vacíos	Estabilidad (kgf)	Flujo (mm)	VMA (%)	VFA (%)	Peso específico (g/cm ³)
Estab. Vs PET	4.54%	6.206	1574.795	4.565	18.48	66.51	2.301
Patrón		4.033	1470.563	4.17	17.857	77.418	2.324

Nota: Elaboración propia

De la Figura 77 y Tabla 60 de la mezcla asfáltica con incorporación de PET se estima que para 4.54% de PET del peso del ligante asfáltico se obtiene una estabilidad máxima de 1574.795 kgf.

Con este valor se ha obtenido una mayor estabilidad respecto a la mezcla patrón. Asimismo, dicha mezcla con contenido de PET reduce el efecto de las deformaciones debido a las cargas de tráfico.

Capítulo IV: Determinación del flujo Marshall del diseño de mezcla asfáltica con material PET reciclado

4.1 Flujo Marshall de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Se realizó el ensayo de estabilidad y flujo a los especímenes de mezcla asfáltica con incorporación de PET, con porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% de cemento asfáltico, en la máquina de carga Marshall donde se obtuvo los valores de flujo en mm que alcanzaron las briquetas frente a las cargas aplicadas.

Figura 78.

Ensayo de estabilidad y flujo de espécimen con PET



Nota: Elaboración propia

4.1.1 Resultados de flujo en mm de especímenes con PET ensayados

Tabla 62.

Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 2% de PET

ESPECIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.9	1194.7	1195.1
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1197.5	1196.4	1197.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	677.8	677.6	679.8
Espesor, mm		64.64	64.86	64.86
Flujo Marshall (mm)		4.286	4.237	3.851
Temperatura de Ensayo, °C		15.3	15.3	15.3

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 63.

Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 4% de PET

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.1	1195.5	1195.3
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1196.7	1198.1	1197.1
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	680.6	680.1	678.8
Espesor, mm		64.59	65.25	64.89
Flujo Marshall (mm)		4.009	5.049	4.537
Temperatura de Ensayo, °C		15.4	15.4	15.4

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 64.

Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 6% de PET

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1194.8	1195.7	1195.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1197.6	1198.2	1198.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	678.4	670.6	674.1
Espesor, mm		64.44	66.16	65.09
Flujo Marshall (mm)		4.604	4.683	4.451
Temperatura de Ensayo, °C		15.7	15.7	15.7

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 65.

Flujo Marshall de mezcla asfáltica con 8% de PET

ESPÉCIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.7	1195.9	1196.7
Masa del espécimen saturado superficialmente seco, g	B	1198.7	1198.9	1199.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	670.8	672	669.3
Espesor, mm		66.23	65.86	66.46
Flujo Marshall (mm)		4.186	4.388	4.611
Temperatura de Ensayo, °C		16.1	15.7	15.7

Nota: Elaboración propia basado en formato de Laboratorio de Mecánica de Suelos FIC UNI

Tabla 66.

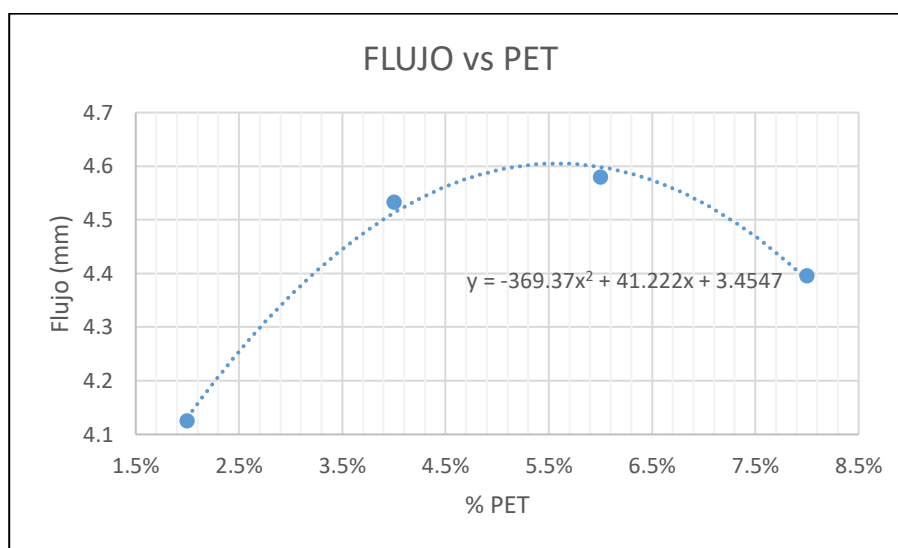
Flujo Marshall de mezcla asfáltica con PET

PET	Flujo(mm)
2.0%	4.125
4.0%	4.532
6.0%	4.579
8.0%	4.395

Nota: Elaboración propia

Figura 79.

Flujo vs porcentaje de PET



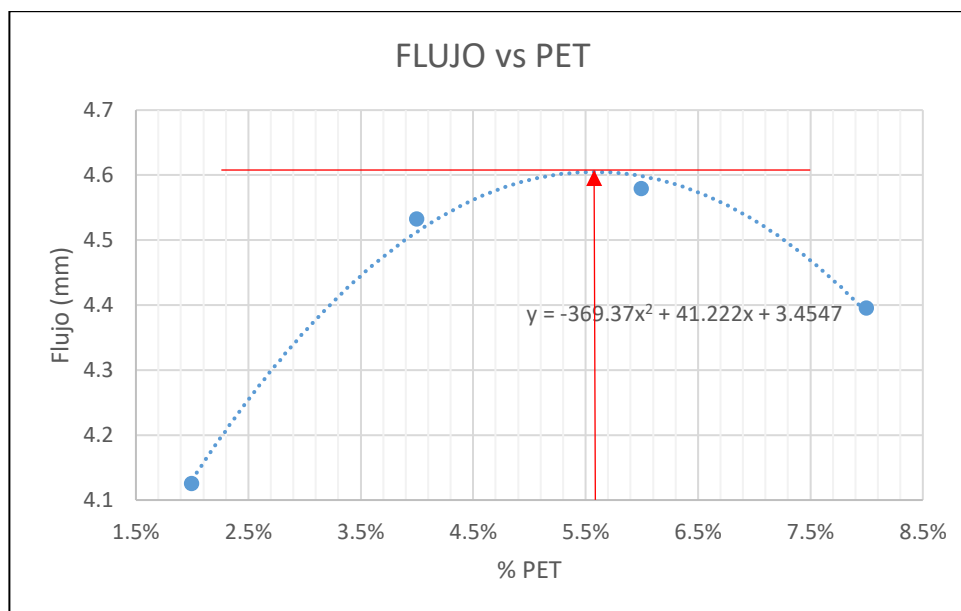
Nota: Elaboración propia

4.1.2 Flujo máximo de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Se obtiene el porcentaje de PET mediante la curva de Flujo vs %PET para obtener el flujo máximo. Se calculó que para la cantidad de PET en 5.58% el peso del cemento asfáltico se tiene que el mayor flujo es 4.605 mm. Asimismo, se obtuvieron los otros parámetros de diseño Marshall.

Figura 80.

Flujo máximo de mezcla asfáltica con incorporación de PET



Nota: Elaboración propia

Tabla 67.

Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 5.58% de PET

FLUJO VS PET	
Flujo (mm)	4.605
%PET	5.58%
Flujo'	0
%PET	0.0558
ESTABILIDAD VS PET	
Estabilidad (kg)	1549.395
%PET	5.58%
VACIOS VS PET	
% Vacíos	6.856
%PET	5.58%
VMA (%)	18.71
VFA (%)	63.51
Peso Específico (g/cm3)	2.293

Nota: Elaboración propia

Tabla 68.

Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 5.58% de PET y mezcla asfáltica convencional

Parámetro Marshall	PET	%vacíos	Estabilidad (kgf)	Flujo(mm)	VMA(%)	VFA(%)	Peso específico (g/cm3)
Flujo vs PET	5.58%	6.856	1549.395	4.605	18.71	63.51	2.293
Patrón		4.033	1470.563	4.17	17.857	77.418	2.324

Nota: Elaboración propia

De la Figura 80 y Tabla 67 de la mezcla asfáltica con incorporación de PET se estima que para 5.58% de PET del peso del ligante asfáltico se obtiene un flujo máximo de 4.605 mm.

Con este valor se ha obtenido un mayor flujo respecto a la mezcla patrón. Asimismo, dicha mezcla con contenido de PET reduce el efecto de las deformaciones debido a las cargas de tráfico y aumenta la flexibilidad de la mezcla.

4.2 Porcentaje de vacíos de mezcla asfáltica con incorporación de PET

Se determinó el porcentaje de PET utilizando la gráfica %VACIOS vs PET, el cual cumpla con los requisitos especificados en el Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013 cuyo límite es 5% de porcentaje de vacíos. Asimismo, se calculó los otros parámetros para dicho porcentaje de PET.

Tabla 69.

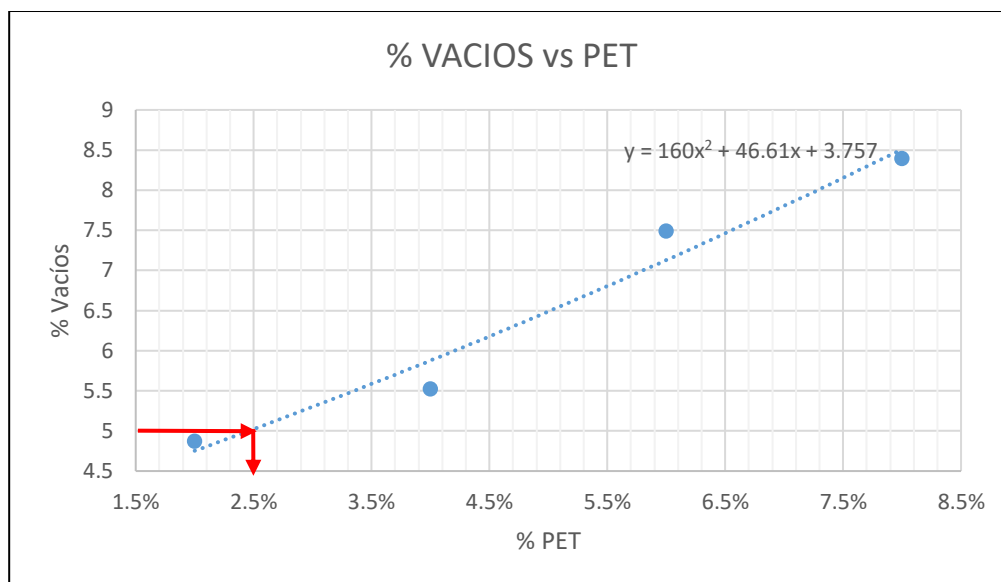
Porcentaje de vacíos de mezcla asfáltica con PET

PET	%vacíos
2.0%	4.872
4.0%	5.521
6.0%	7.486
8.0%	8.391

Nota: Elaboración propia

Figura 81.

Porcentaje de vacíos máximo según EG – 2013 de mezcla asfáltica con incorporación de PET



Nota: Elaboración propia

Tabla 70.

Parámetros de diseño Marshall de mezcla asfáltica con 2.46% de PET

VACIOS VS PET	
% Vacíos	5.000
%PET	2.46%
ESTABILIDAD VS PET	
Estabilidad (kg)	1471.692
%PET	2.46%
FLUJO VS PET	
Flujo (mm)	4.245
%PET	2.46%
VMA (%)	18.37
VFA (%)	72.74
Peso Específico (g/cm3)	2.307

Nota: Elaboración propia

Tabla 71.

Comparativa de parámetros Marshall de mezcla asfáltica con 2.46% de PET y mezcla asfáltica convencional

Parámetro Marshall	PET	%vacíos	Estabilidad (kgf)	Flujo(mm)	VMA(%)	VFA(%)	Peso específico (g/cm3)
%vacíos vs PET	2.46%	5.000	1471.692	4.245	18.37	72.74	2.307

Patrón	4.033	1470.563	4.17	17.857	77.418	2.324
--------	-------	----------	------	--------	--------	-------

Nota: Elaboración propia

De la Figura 81 y Tabla 70 de la mezcla asfáltica con incorporación de PET se estima que para 5% de vacíos, límite propuesto por MTC, se obtiene un 2.46% de contenido de PET.

Con este valor se ha obtenido un mayor flujo respecto a la mezcla patrón. Asimismo, dicha mezcla con contenido de PET aumenta la capacidad de drenaje.

Tabla 72.

Cuadro resumen de propiedades mecánicas

Propiedad mecánica	%vacíos vs PET	Estab. Vs PET	Flujo vs PET	Patrón
PET	2.46%	4.54%	5.58%	
%vacíos	5.000	6.206	6.856	4.033
Estabilidad (kgf)	1471.692	1574.795	1549.395	1470.563
Flujo(mm)	4.245	4.565	4.605	4.170
VMA	18.37	18.48	18.71	17.86
VFA	72.745	66.515	63.510	77.418
Peso específico	2.307	2.301	2.293	2.324

Nota: Elaboración propia

4.3 Propuesta de mezcla asfáltica modificada y mezcla asfáltica convencional para vías colectoras urbanas

En el presente ítem se desarrollará una propuesta de la mezcla asfáltica modificada en función de la mezcla patrón basado en diseño de espesores, evaluación de fallas de dichos diseños y análisis de precio unitario; para medir el comportamiento de manera más integral de la mezcla propuesta asumiendo para ello la intensidad de tráfico correspondientes a las vías colectoras urbanas más representativas del alcance espacial que es el distrito de Villa El Salvador.

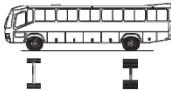
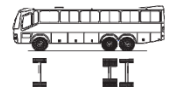



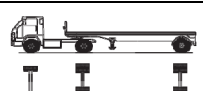
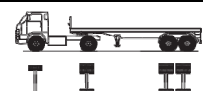
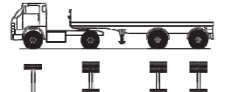

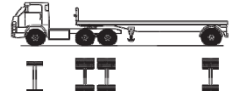
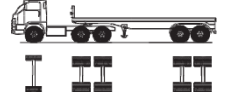



A continuación, se presentará cada uno de los parámetros considerados empezando por los factores de vehículos que circulan en la zona, el estudio de tráfico de las vías (ejes equivalentes), diseño de espesores, análisis de esfuerzos y deformaciones y costos unitarios.

4.3.1 Factor vehículo pesado (F_{vp})

Los vehículos pesados con sus respectivos factores de vehículos pesados que se contaron en la vía colectora urbana Av. Revolución fueron los siguientes:

Tabla 73.

Factor vehículo pesado (Fvp) utilizado para vía colectora urbana Av. Central y Revolución

TABLA DE PESOS Y MEDIDAS											
N°	Conf. Vehicular	N° de ejes	Descripción gráfica de los vehículos	Long. Máx (m)	Eje Delantero	Peso máximo (t)				Peso bruto máx (t)	Factor vehículo pesado
						Conjunto de ejes posteriores					
						1°	2°	3°	4°		
1	B2	2		14	7	11	-	-	-	18	4.5037
2	B3-1	3		14 (convencional) 15 (integral)	7	16	-	-	-	23	2.6313
3	C2	2		12.3	7	11	-	-	-	18	4.5037
4	C3	3		13.2	7	18	-	-	-	25	3.2846
5	C4	4		13.2	7	23	-	-	-	30	2.7736
6	T2S1	3		20.5	7	11	11	-	-	29	7.7419
7	T2S2	4		20.5	7	11	18	-	-	36	6.5229
8	T2Se2	4		20.5	7	11	11	11	-	40	10.9802
9	T2S3	5		20.5	7	11	25	-	-	43	6.2097
10	T3S1	4		20.5	7	18	11	-	-	36	6.5229
11	T3S2	5		20.5	7	18	18	-	-	43	5.3038
12	T3S3	6		22	7	18	25	-	-	50	4.9906
13	MICRO BUS	2			1	2	0	-	-	3	0.0090
14	AUTOS Y COMBIS	2			1	0.8	0	-	-	1.8	0.0007

Nota: Elaboración propia

4.3.2 Conteo vehicular en vía colectora urbana

El conteo vehicular para esta investigación se realizó en la vía colectora urbana Av. Central y Av. Revolución en el distrito de Villa El Salvador.

Tabla 74.

Conteo vehicular en Av. Revolución con sentido de Norte a Sur

FORMATO DE AFORO VEHICULAR																										
PUNTO DEL CONTROL: REVOLUCION CON AV. VELA													SENTIDO: Norte - Sur													
UBICACIÓN: AV. REVOLUCION													FECHA: 27/10/2024													
DISTRITO: VILLA EL SALVADOR													CLIMA: -													
SUPERVISOR: ALONSO LOPEZ MEDINA													AFORADOR: -													
DIAGRA. VEH.																										
</																										

Nota: Elaboración propia

Tabla 75.















Conteo vehicular en Av. Revolución con sentido de Sur a Norte

FORMATO DE AFORO VEHICULAR																											
PUNTO DEL CONTROL														SENTIDO: Sur - Norte													
UBICACIÓN														FECHA: 27/10/2024													
DISTRITO														CLIMA:													
SUPERVISOR														AFORADOR: -													

Nota: Elaboración propia

Tabla 76.















Conteo vehicular en Av. Central con sentido de Norte a Sur

PUNTO DEL CONTROL				Av. Central										FECHA				jueves, 7 de Noviembre de 2024			
SENTIDO				N - S										HORARIO				06:00 - 10:00			
UBICACIÓN				Av. El Sol / Jr. Cesar Vallejo (Campo Ferial Cuaves)																	
DISTRITO				Villa El Salvador																	
DIAGRA. VEH.				             																	
INTERVALO	AUTO	TAXI FORMAL	TAXI INFORMAL	COLECTIVOS	BICICLETAS	MOTOCICLETAS	MOTO - TAXI	BUS INTERPROVINCIAL	CAMIÓN PEQUEÑO	CAMIÓN	TRAILER	COMBI	MICROBUS	OMNIBUS	OTROS	TOTAL X 14 HORA	SUMA HORARIA	GRAN TOTAL	SUMA HORARIA		
06:00 a 06:15	2	0	7	3	0	0	5	0	0	0	0	15	2	3	0	37		51			
06:15 a 06:30	6	3	3	2	0	0	12	0	2	0	0	13	0	4	0	45		74			
06:30 a 06:45	6	0	12	3	0	0	12	0	0	2	0	10	2	5	0	52		72			
06:45 a 07:00	6	2	6	2	0	0	23	0	2	0	0	23	0	4	0	68	202	81	278		
07:00 a 07:15	8	0	5	0	0	0	23	0	0	0	0	23	2	6	0	67	232	95	322		
07:15 a 07:30	8	8	6	3	0	0	30	0	0	2	0	29	4	7	0	97	284	168	416		
07:30 a 07:45	18	5	7	18	0	0	59	0	4	2	0	40	4	8	0	165	397	245	589		
07:45 a 08:00	27	7	10	3	0	0	61	0	9	2	0	57	6	5	0	187	516	306	814		
08:00 a 08:15	19	7	13	0	2	2	78	0	4	4	0	65	3	8	0	205	654	304	1023		
08:15 a 08:30	20	4	12	0	0	3	64	0	0	0	0	64	3	5	0	175	732	259	1114		
08:30 a 08:45	18	5	14	0	0	2	84	0	4	4	0	58	6	11	0	206	773	297	1166		
08:45 a 09:00	19	4	12	0	2	0	79	0	6	2	0	52	3	8	0	187	773	262	1122		
09:00 a 09:15	23	3	13	0	2	0	71	0	4	9	0	59	7	10	0	201	769	269	1087		
09:15 a 09:30	15	7	18	0	0	0	78	0	4	7	0	46	6	13	0	194	788	263	1091		
09:30 a 09:45	18	4	19	0	0	2	96	0	4	7	0	74	11	7	0	242	824	315	1109		
09:45 a 10:00	24	5	10	0	2	0	100	0	2	0	0	64	7	11	0	225	862	244	1091		

Nota: Elaboración propia

Tabla 77.

Conteo vehicular en Av. Central con sentido de Sur a Norte

PUNTO DEL CONTROL				Av. Central												FECHA				13/08/2009		
SENTIDO				S - N												HORARIO				06:00 - 10:00		
UBICACIÓN				Av. El Sol / Jr. Cesar Vallejo (Campo Ferial Cuaves)																		
DISTRITO				Villa El Salvador																		
DIAGRA. VEH.				             																		
HORA CADA 15 Min	AUTO	TAXI FORMAL	TAXI INFORMAL	COLECTIVOS	BICICLETAS	MOTOCICLETAS	MOTO - TAXI	BUS INTERPROVINCIAL	CAMIÓN PEQUEÑO	CAMIÓN	TRAILER	COMBI	MICROBUS	OMNIBUS	OTROS	TOTAL X 14 HORA	SUMA HORARIA					
06:00 a 06:15	3	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	3	0	0	0	14						
06:15 a 06:30	4	2	3	0	0	0	11	3	0	0	0	4	0	2	0	29						
06:30 a 06:45	7	2	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	20						
06:45 a 07:00	4	2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	2	0	13	76					
07:00 a 07:15	5	0	5	0	0	0	7	2	0	4	0	3	0	2	0	28	90					
07:15 a 07:30	14	4	12	0	0	0	38	0	0	0	0	3	0	0	0	71	132					
07:30 a 07:45	8	7	10	0	0	2	49	0	0	2	0	0	0	2	0	80	192					
07:45 a 08:00	15	2	11	0	2	2	83	0	0	2	0	2	0	0	0	119	298					
08:00 a 08:15	12	4	6	0	0	2	67	0	0	2	0	4	0	2	0	99	369					
08:15 a 08:30	4	6	6	0	0	0	61	0	4	0	0	3	0	0	0	84	382					
08:30 a 08:45	8	6	6	0	0	3	56	0	4	4	0	2	0	2	0	91	393					
08:45 a 09:00	18	4	5	0	0	2	42	0	0	4	0	0	0	0	0	75	349					
09:00 a 09:15	7	4	8	0	0	3	40	0	0	4	0	2	0	0	0	68	318					
09:15 a 09:30	7	2	2	0	0	0	50	0	2	4	0	0	0	2	0	69	303					
09:30 a 09:45	4	2	8	0	0	0	55	0	2	0	0	2	0	0	0	73	285					
09:45 a 10:00	5	0	6	0	0	2	0	0	4	2	0	0	0	0	0	19	229					

Nota: Elaboración propia

4.3.2.1 VHD en vías colectoras urbanas Av. Central y Av. Revolución

La hora punta en la Av. Revolución es de 5:15pm a 6:15pm.

Tabla 78.

VHD de Av. Revolución

		FORMATO DE AFORO VEHICULAR																							
		PUNTO DEL CONTROL: REVOLUCION CON AV. VELAZQUEZ																SENTIDO: Norte - Sur							
		UBICACIÓN: AV. REVOLUCION																FECHA: 27/10/2024							
		DISTRITO: VILLA EL SALVADOR																CLIMA: -							
		SUPERVISOR: ALONSO LOPEZ MEDINA																AFORADOR: -							
DIAGRA. VEH.																									
FECHA	intervalo	Moto Lineal	Mototaxi	SEDAN	MINIBAN	PICK UP	CAMIONETA	PANEL	CAMIONETA RURAL (COMBI)	MICROBUS	OMNIBUS	OMNIBUS INTERPR. OVINCIAL	CAMION DE 2 EJES pequeña	CAMION DE 2 EJES grande	CAMION DE 3 EJES C2	CAMION DE 4 EJES C3	CAMION DE 4 EJES C4	T2S1	T2S2	T2se2	T2S3	T3S1	T3S2	T3S3	TOTAL N - S
Domingo 27/10/2024	Norte - Sur	42	601	172	11	3	38	10	23	0	6	0	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	914
Domingo 27/10/2024	Sur - Norte	33	349	204	23	10	43	1	87	13	34	0	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	804
VHD (hora punta)		38	475	188	17	7	41	6	55	7	20	0	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	862
Fvp por unidad				0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.009	4.5037	2.6313	4.5037	4.5037	4.5037	3.2846	2.7736	7.7419	6.5229						
Fvp x VHD		0	0	0.1316	0.0119	0.0049	0.0287	0.0042	0.0385	0.063	90.074	0	18.015	9.0074	9.0074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	126.4

Nota: Elaboración propia

De la siguiente tabla se tiene un Volumen Horario de Diseño (VHD) de 862 vehículos. Considerando los vehículos pesados y livianos, se multiplica el VHD por tipo de vehículo por su factor camión y calculando la sumatoria obtenemos para el VHD un total de 126.4 EE por hora.

La hora punta en la Av. Central es de 7:45 am a 8:45 am.

Tabla 79.

VHD de Av. Central

DIAGRA. VEH.																
INTERVALO	AUTO	TAXI FORMAL	TAXI INFORMAL	COLECTIVOS	BICICLETAS	MOTOCICLETAS	MOTO - TAXI	BUS INTERPROVINCIAL	CAMIÓN PEQUEÑO	CAMIÓN	TRAILER	COMBI	MICROBUS	OMNIBUS	OTROS	TOTAL X 154 HORA
N-S	84	23	49	3	2	7	287	0	17	10	0	244	18	29	0	
S-N	39	18	29	0	2	7	267	0	8	8	0	11	0	4	0	
VHD (hora punta)	123	41	78	3	4	14	554	0	25	18	0	255	18	33	0	1166
Fvp por unidad	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007				2.6313	4.5037	3.2846	7.7419	0.0007	0.009	4.5037		
Fvp x VHD	0.0861	0.0287	0.0546	0.0021	0	0	0	0	112.5925	59.1228	0	0.1785	0.162	148.6221	0	320.8494

Nota: Elaboración propia

De la siguiente tabla se tiene un Volumen Horario de Diseño (VHD) de 1166 vehículos. Considerando los vehículos pesados y livianos, se multiplica el VHD por tipo de vehículo por su factor camión y calculando la sumatoria obtenemos para el VHD un total de 320.8494 EE por hora.

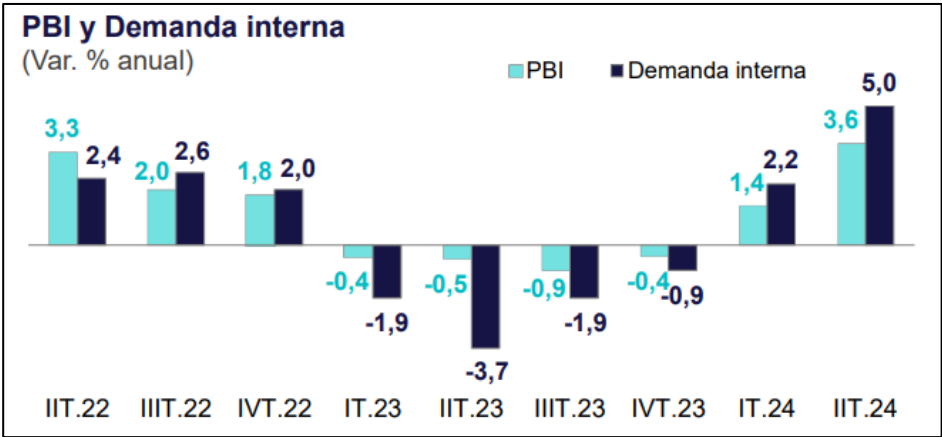
4.3.2.2 Repeticiones de ejes equivalentes en el periodo de diseño

Se calculó el número de repeticiones de ejes equivalentes para un periodo de diseño de 20 años y una tasa de crecimiento de 3.6% según el crecimiento del PBI en el

segundo trimestre del 2024 para las avenidas Revolución y Central. Asimismo, se utiliza la relación entre el VHD y el IMD recomendado en el manual de carretera DG 2018. Por ello, se calcula para el VHD entre 12% y 18%.

$VHD = 0.12 \sim 0.18 \text{ IMD}$

Figura 82.
Actividad económica en el segundo trimestre del 2024



Nota: Banco Central de Reserva del Perú

Tabla 80.
Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=12%IMD Av. Revolución

n	20 años
r=	3.6
Fca=	28.57
To=	862 veh/dia
Tn=	1688 veh/dia
Fd=	0.5
Fc=	0.8
Fp=	1.75 para espesor 10cm y 110 PCN
IMD x Fvp=	1053.22 VHDxFvp entre 12%
EE día-carril=	737.254
NrepEE8.2Tn=	7,688,121.57 EE (PARA 12%)

Nota: Elaboración propia

Tabla 81.
Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=18%IMD Av. Revolución

n	20 años
r=	3.6
Fca=	28.57
To=	862 veh/dia
Tn=	1688 veh/dia

Fd=	0.5	
Fc=	0.8	
Fp=	1.75	para espesor 10cm y 110 PCN
IMD x Fvp=	702.15	VHDxFvp entre 18%
EE día-carril=	491.503	
NrepEE8.2Tn=	5,125,414.38	EE (PARA 18%)

Nota: Elaboración propia

Tabla 82.

Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=12%IMD Av. Central

n	20 años	
r=	3.6	
Fca=	28.57	
To=	1166	veh/día
Tn=	2283	veh/día
Fd=	0.5	
Fc=	0.8	
Fp=	1.75	para espesor 10cm y 110 PCN
IMD x Fvp=	2673.75	VHDxFvp entre 12%
EE día-carril=	1871.622	
NrepEE8.2Tn=	19,517,362.58	EE (PARA 12%)

Nota: Elaboración propia

Tabla 83.

Repeticiones de ejes equivalentes para VHD=18%IMD Av. Central

n	20 años	
r=	3.6	
Fca=	28.57	
To=	1166	veh/día
Tn=	2283	veh/día
Fd=	0.5	
Fc=	0.8	
Fp=	1.75	para espesor 10cm y 110 PCN
IMD x Fvp=	1782.50	VHDxFvp entre 18%
EE día-carril=	1247.748	
NrepEE8.2Tn=	13,011,575.06	EE (PARA 18%)

Nota: Elaboración propia

Donde:

n: periodo de diseño

r: tasa de crecimiento anual

Fca: factor de crecimiento acumulado para el periodo de diseño

To: tránsito actual en vehículos/día

Tn: tránsito proyectado al año “n” en vehículos por día

Fd: factor direccional

Fc: factor carril

Fp: factor presión

4.3.3 *Diseño de espesores de pavimento flexible*

4.3.3.1 Método AASHTO 93

Mediante la hoja de cálculo e iteraciones se obtiene el número estructural de diseño y se propone los espesores de las capas y coeficientes para el número estructural propuesto.

Asimismo, se utilizó un CBR al 95% de la MDS de 19.7 para la subrasante según Capcha y Ortega (2023) en el distrito de Villa El Salvador. Con dicho CBR se determina un Mr de 17.21 ksi o 118.66 MPa.

Tabla 84.*Diseño de pavimento flexible para VHD=12%IMD Av. Revolución*

DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE METODO AASHTO 1993																													
PROYECTO : Diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras																													
UBICACIÓN : Villa El Salvador			FECHA : 02/11/2024																										
1. REQUISITOS DEL DISEÑO																													
a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	20																												
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	7.69E+06																												
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4.0																												
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	2.5																												
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	90%																												
DESVIACION ESTANDAR NORMAL (Zr)	-1.282																												
DESVIACION ESTANDAR COMBINADA (So)	0.45																												
2. PROPIEDADES DE MATERIALES																													
a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN ²)																													
b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE																													
c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	17.210 ksi																												
3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL (Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)																													
SN Requerido	G_t	N18 NOMINAL		N18 CALCULO																									
3.64	-0.25527	6.89		6.89																									
3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO																													
a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA																													
Concreto Asfáltico (a1)	0.17 /cm																												
Base granular (a2)	0.05 /cm																												
Subbase (a3)	0.05 /cm																												
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA																													
Base granular (m2)	1.00																												
Subbase (m3)	1.00																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">ALTERNATIVA</th> <th style="padding: 5px;">SNreq</th> <th style="padding: 5px;">SNresul</th> <th style="padding: 5px;">D1(cm) carpeta</th> <th style="padding: 5px;">D2(cm) base</th> <th style="padding: 5px;">D3(cm) sub-base</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">1</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3.64</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">4.11</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">11.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">25</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">2</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3.64</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">4.78</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">12.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3.64</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">5.44</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">13.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">35</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> </tr> </tbody> </table>						ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base	1	3.64	4.11	11.00	25	20	2	3.64	4.78	12.00	30	25	3	3.64	5.44	13.00	35	30
ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base																								
1	3.64	4.11	11.00	25	20																								
2	3.64	4.78	12.00	30	25																								
3	3.64	5.44	13.00	35	30																								
Comentarios: SN resul > SN req																													

Nota: Elaboración propia

Tabla 85.**Diseño de pavimento flexible para VHD=18%IMD Av. Revolución**

DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE METODO AASHTO 1993																													
PROYECTO : Diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras																													
UBICACIÓN : Villa El Salvador			FECHA : 02/11/2024																										
1. REQUISITOS DEL DISEÑO																													
a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	20																												
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	5.13E+06																												
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4.0																												
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pf)	2.5																												
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	90%																												
DESVIACION ESTANDAR NORMAL (Zr)	-1.282																												
DESVIACION ESTANDAR COMBINADA (So)	0.45																												
2. PROPIEDADES DE MATERIALES																													
a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN2)																													
b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE																													
c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	17.210 ksi																												
3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL (Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)																													
SN Requerido	G_t	N18 NOMINAL		N18 CALCULO																									
3.39	-0.25527	6.71		6.71																									
3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO																													
a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA																													
Concreto Asfáltico (a1)					0.17 /cm																								
Base granular (a2)					0.05 /cm																								
Subbase (a3)					0.05 /cm																								
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA																													
Base granular (m2)					1.00																								
Subbase (m3)					1.00																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">ALTERNATIVA</th> <th style="width: 10%;">SNreq</th> <th style="width: 10%;">SNresul</th> <th style="width: 15%;">D1(cm) carpeta</th> <th style="width: 15%;">D2(cm) base</th> <th style="width: 15%;">D3(cm) sub-base</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3.39</td> <td style="text-align: center;">3.94</td> <td style="text-align: center;">10.00</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3.39</td> <td style="text-align: center;">4.35</td> <td style="text-align: center;">11.00</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3.39</td> <td style="text-align: center;">5.01</td> <td style="text-align: center;">12.00</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">30</td> </tr> </tbody> </table>						ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base	1	3.39	3.94	10.00	25	20	2	3.39	4.35	11.00	25	25	3	3.39	5.01	12.00	30	30
ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base																								
1	3.39	3.94	10.00	25	20																								
2	3.39	4.35	11.00	25	25																								
3	3.39	5.01	12.00	30	30																								
Comentarios: SN resul > SN req																													

Nota: Elaboración propia

Tabla 86.*Diseño de pavimento flexible para VHD=12%IMD Av. Central*

DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE METODO AASHTO 1993																													
PROYECTO : Diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras																													
UBICACIÓN : Villa El Salvador			FECHA : 08/11/2024																										
1. REQUISITOS DEL DISEÑO																													
a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	20																												
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	1.95E+07																												
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4.2																												
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	3.0																												
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	95%																												
DESVIACION ESTANDAR NORMAL (Zr)	-1.645																												
DESVIACION ESTANDAR COMBINADA (So)	0.45																												
2. PROPIEDADES DE MATERIALES																													
a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN2)																													
b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE																													
c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	17.210 ksi																												
3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL (Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)																													
SN Requerido	G_f	N18 NOMINAL		N18 CALCULO																									
4.81	-0.35218	7.29		7.29																									
3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO																													
a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA																													
Concreto Asfáltico (a1)	0.17 /cm																												
Base granular (a2)	0.05 /cm																												
Subbase (a3)	0.05 /cm																												
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA																													
Base granular (m2)	1.00																												
Subbase (m3)	1.00																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">ALTERNATIVA</th> <th style="padding: 5px;">SNreq</th> <th style="padding: 5px;">SNresul</th> <th style="padding: 5px;">D1(cm) carpeta</th> <th style="padding: 5px;">D2(cm) base</th> <th style="padding: 5px;">D3(cm) sub-base</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">1</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">4.81</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">5.41</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">14.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">2</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">4.81</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">5.58</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">15.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;">3</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">4.81</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">6.26</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">16.00</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">35</td> <td style="text-align: center; padding: 5px;">35</td> </tr> </tbody> </table>						ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base	1	4.81	5.41	14.00	30	30	2	4.81	5.58	15.00	30	30	3	4.81	6.26	16.00	35	35
ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base																								
1	4.81	5.41	14.00	30	30																								
2	4.81	5.58	15.00	30	30																								
3	4.81	6.26	16.00	35	35																								
Comentarios: SN resul > SN req																													

Nota: Elaboración propia

Tabla 87.*Diseño de pavimento flexible para VHD=18%IMD Av. Central*

DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE METODO AASHTO 1993																													
PROYECTO : Diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET para mejorar sus propiedades mecánicas en vías colectoras																													
UBICACIÓN : Villa El Salvador			FECHA : 08/11/2024																										
1. REQUISITOS DEL DISEÑO																													
a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	20																												
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	1.30E+07																												
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	4.0																												
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	2.5																												
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	90%																												
DESVIACION ESTANDAR NORMAL (Zr)	-1.282																												
DESVIACION ESTANDAR COMBINADA (So)	0.45																												
2. PROPIEDADES DE MATERIALES																													
a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN2)																													
b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE																													
c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi)	17.210 ksi																												
3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL (Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)																													
SN Requerido	G_t	N18 NOMINAL		N18 CALCULO																									
3.96	-0.25527	7.11		7.11																									
3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO																													
a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA																													
Concreto Asfáltico (a1)	0.17 /cm																												
Base granular (a2)	0.05 /cm																												
Subbase (a3)	0.05 /cm																												
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA																													
Base granular (m2)	1.00																												
Subbase (m3)	1.00																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">ALTERNATIVA</th> <th style="text-align: center;">SNreq</th> <th style="text-align: center;">SNresul</th> <th style="text-align: center;">D1(cm) carpeta</th> <th style="text-align: center;">D2(cm) base</th> <th style="text-align: center;">D3(cm) sub-base</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3.96</td> <td style="text-align: center;">4.74</td> <td style="text-align: center;">13.00</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3.96</td> <td style="text-align: center;">4.91</td> <td style="text-align: center;">14.00</td> <td style="text-align: center;">25</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3.96</td> <td style="text-align: center;">5.58</td> <td style="text-align: center;">15.00</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">30</td> </tr> </tbody> </table>						ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base	1	3.96	4.74	13.00	25	25	2	3.96	4.91	14.00	25	25	3	3.96	5.58	15.00	30	30
ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm) carpeta	D2(cm) base	D3(cm) sub-base																								
1	3.96	4.74	13.00	25	25																								
2	3.96	4.91	14.00	25	25																								
3	3.96	5.58	15.00	30	30																								
Comentarios: SN resul > SN req																													

Nota: Elaboración propia

4.3.3.2 Método Instituto del Asfalto (espesor pleno)

Utilizando la Carta del Instituto del Asfalto y con los datos de entrada:

Av. Revolución:

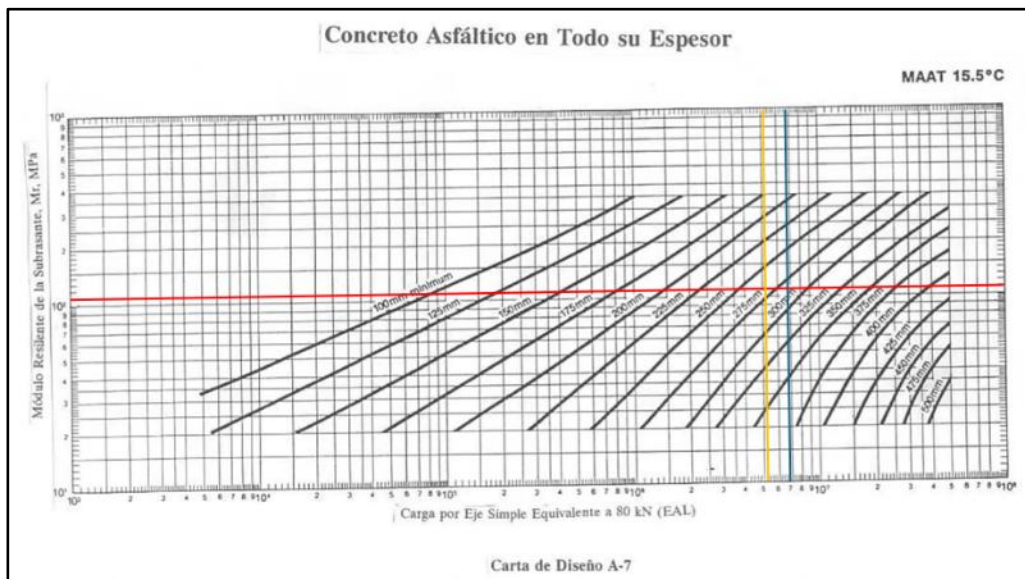
Módulo resiliente de la Subrasante: 118.66 MPa.

EAL (VHD=12%IMD): 7.69×10^6

EAL (VHD=18%IMD): 5.13×10^6

Figura 83.

Espesor pleno para Av. Revolución



Nota: Elaboración propia basada en carta de diseño del Manual de diseño del Instituto del Asfalto

De lo anterior se tiene los espesores plenos para el 12% y 18% del IMD de Av. Revolución.

Espesor pleno (VHD=12%IMD) = 30 cm

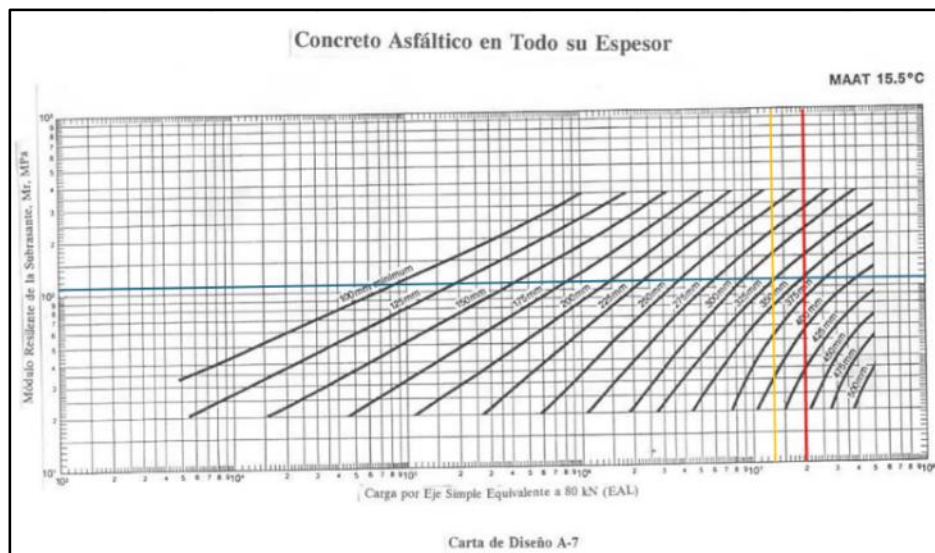
Espesor pleno (VHD=18%IMD) = 27.5 cm

Av. Central:

Módulo resiliente de la Subrasante: 118.66 MPa.

EAL (VHD=12%IMD): 19.5×10^6

EAL (VHD=18%IMD): 13.0×10^6

Figura 84.*Espesor pleno para Av. Central*

Nota: Elaboración propia basada en carta de diseño del Manual de diseño del Instituto del Asfalto.

De lo anterior se tiene los espesores plenos para el 12% y 18% del IMD de Av. Revolución.

Espesor pleno (VHD=12%IMD) = 37.5 cm

Espesor pleno (VHD=18%IMD) = 32.5 cm

4.3.4 Análisis de esfuerzos y deformaciones: fallas por fatiga y ahuellamiento

Para el cálculo de la deformación de tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y de la deformación vertical de compresión en la fibra superior de la subrasante se utilizó el software PITRA PAVE v1.0.0, que utiliza la teoría de capa multielástica para el cálculo de deformaciones, esfuerzos y deflexiones, considerando los módulos elásticos y relación de Poisson siguientes debido a que se tiene limitaciones para obtener el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica con PET y con la finalidad de ilustrar procedimientos con fines correspondientes al análisis de esfuerzos y deformaciones se utilizará el módulo de elasticidad correspondiente a una carpeta asfáltica con asfalto modificado.

Tabla 88.

Módulos elásticos (E) considerados para análisis en PITRA PAVE

Material	Rango (MPa)	Valor típico (MPa)
----------	-------------	--------------------

Carpeta Asfáltica Convencional	2000-4000	3000
Carpeta Asfáltica con asfalto modificado	4000-6000	5000
Base hidráulica	270-350	310
Subrasante	190-260	220

Nota: (Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

Tabla 89.

Relaciones de Poisson (ν) considerados para análisis en PITRA PAVE

Material	Rango	Valor típico
Carpeta Asfáltica Convencional	0.15-0.45	0.30
Carpeta Asfáltica con asfalto modificado	0.15-0.30	0.20
Base hidráulica	0.30-0.40	0.35
Subrasante	0.30-0.50	0.40

Nota: (Instituto Mexicano del Transporte, 2018).

Asimismo, se consideró la carga más crítica para el pavimento la cual sería la correspondiente a un eje simple, 3.5 ton o 34323.28 N por rueda, y una presión de 110 PSI o 758423.0 Pa.

4.3.4.1 Fatiga y ahuellamiento caso desfavorable

De acuerdo a los modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell el caso más desfavorable se da cuando se utiliza el módulo de elasticidad de mayor valor, debido al exponente negativo que se presenta en la fórmula.

Ecuación del Instituto del Asfalto:

$$N_f = 0.0796 \varepsilon_t^{-3.291} E_1^{-0.854}$$

Ecuación de la compañía Shell:

$$N_f = 0.0685 \varepsilon_t^{-5.671} E_1^{-2.363}$$

Por lo tanto, con ambos modelos de fatiga y ahuellamiento se calculó el número de ejes equivalentes máximos permitidos para corroborar dichos diseños.

Av. Revolución

Número de ejes equivalentes total W18

Para 12%IMD y espesor pleno al 12%IMD: 7,688,121.57 EE

Utilizando E=4000 Mpa

Tabla 90.

Fracturamiento por fatiga con E=4000Mpa para 12%IMD Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga	
$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$	
Instituto del Asfalto	
Nf=	4.84E+07
Compañía Shell	
Nf=	5.76E+10

Nota: Elaboración propia

Tabla 91.

Deformación permanente con E=4000Mpa para 12%IMD Av. Revolución

Modelos de deformación permanente	
$N_d = f_4 \varepsilon_i^{-f_5} \quad (4.5)$	
Compañía Shell 50% confiabilidad	
Nf=	1.69E+09
Compañía Shell 85% confiabilidad	
Nf=	5.32E+08
Compañía Shell 95% confiabilidad	
Nf=	2.88E+08
Instituto del asfalto	
Nf=	2.60E+08

Nota: Elaboración propia

Los valores N_f calculados con el método del Instituto del Asfalto y Compañía Shell son mayores al W18 del estudio de tráfico, por lo tanto, cumple al considerar los valores de módulos elásticos promedio o menores al valor máximo tomado.

Para 18%IMD y espesor pleno al 18%IMD: 5,125,414.38 EE

Utilizando $E=4000$ Mpa

Tabla 92.

Fracturamiento por fatiga con $E=4000$ Mpa para 18%IMD Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga	
$N_f = f_1 \epsilon^{-f_2} \quad (4.4)$	
Instituto del Asfalto	
$N_f=$	3.81E+07
Compañía Shell	
$N_f=$	3.81E+10

Nota: Elaboración propia

Tabla 93.

Deformación permanente con $E=4000$ Mpa para 18%IMD Av. Revolución

Modelos de deformación permanente	
$N_d = f_4 \epsilon^{-f_5} \quad (4.5)$	
Compañía Shell 50% confiabilidad	
$N_f=$	1.34E+09
Compañía Shell 85% confiabilidad	
$N_f=$	4.24E+08
Compañía Shell 95% confiabilidad	
$N_f=$	2.30E+08
Instituto del asfalto	
$N_f=$	2.01E+08

Nota: Elaboración propia

Los valores N_f calculados con el método del Instituto del Asfalto y Compañía Shell son mayores al W18 del estudio de tráfico, por lo tanto, cumple al considerar los valores de módulos elásticos promedio o menores al valor máximo tomado.

Av. Central

Número de ejes equivalentes total W18

Para 12%IMD y espesor pleno al 12%IMD: 19,517,362.58 EE

Utilizando $E=4000$ Mpa

Tabla 94.

Fracturamiento por fatiga con $E=4000$ Mpa para 12%IMD Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_c^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 1.03E+08$

Compañía Shell

$N_f = 2.10E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 95.

Deformación permanente con $E=4000$ Mpa para 12%IMD Av. Central

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

$N_f = 1.40E+10$

Compañía Shell 85% confiabilidad

$N_f = 4.43E+09$

Compañía Shell 95% confiabilidad

Nf=	2.40E+09
Instituto del asfalto	
Nf=	2.78E+09

Nota: Elaboración propia

Los valores Nf calculados con el método del Instituto del Asfalto y Compañía Shell son mayores al W18 del estudio de tráfico, por lo tanto, cumple al considerar los valores de módulos elásticos promedio o menores al valor máximo tomado.

Para 18%IMD y espesor pleno al 18%IMD: 13,011,575.06 EE

Utilizando E=4000 Mpa

Tabla 96.

Fracturamiento por fatiga con E=4000Mpa para 18%IMD Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga	
$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$	
Instituto del Asfalto	
Nf=	7.95E+07
Compañía Shell	
Nf=	1.36E+11

Nota: Elaboración propia

Tabla 97.

Deformación permanente con E=4000Mpa para 18%IMD Av. Central

Modelos de deformación permanente	
$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$	
Compañía Shell 50% confiabilidad	
Nf=	4.45E+09
Compañía Shell 85% confiabilidad	
Nf=	1.40E+09
Compañía Shell 95% confiabilidad	

$N_f=$	7.60E+08
Instituto del asfalto	
$N_f=$	7.69E+08

Nota: Elaboración propia

Los valores N_f calculados con el método del Instituto del Asfalto y Compañía Shell son mayores al W18 del estudio de tráfico, por lo tanto, cumple al considerar los valores de módulos elásticos promedio o menores al valor máximo tomado.

4.3.4.2 Fatiga y ahuellamiento en Av. Revolución

Figura 85.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución

Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 4

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (t)	Espesor h (m)	Descripción
1	3.0E9	0.3	0.11	Carpetas asfáltica convencional
2	3.1E8	0.35	0.25	Base hidráulica
3	3.1E8	0.35	0.2	Base hidráulica
4	2.0E8	0.4		Subrasante

Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 1

#	Carga P (kN)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	756423.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 2

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.11	1
2	0.0	0.0	0.56	3

Resultados del modelo en los puntos especificados

#	E _{xx} (t)	Deformaciones		E _{yy} (t)	E _{zz} (t)	E _{xy} (t)	E _{xz} (t)	E _{yz} (t)
		E _{xx} (t)	E _{yy} (t)					
1	-2.4905e-04	-2.4905e-04	-2.4905e-04	2.7945e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-6.3931e-05	-6.3931e-05	-6.3931e-05	1.3819e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 98.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_r^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 6.18E+07$

Compañía Shell

$N_f = 1.14E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 99.

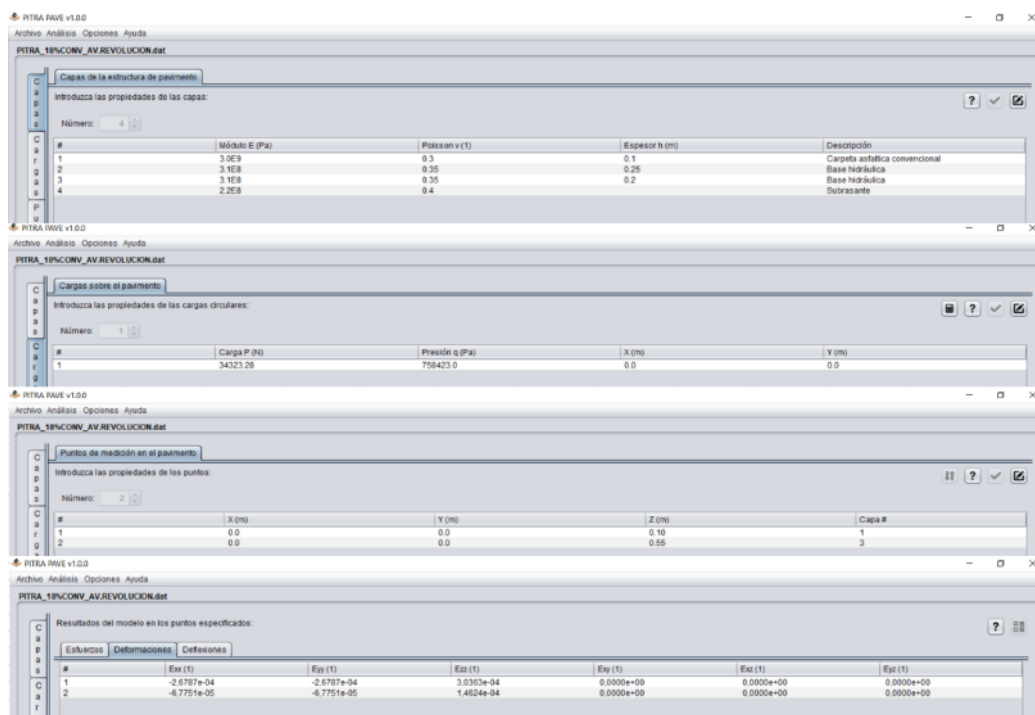
Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución

Modelos de deformación permanente	
$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$	
Compañía Shell 50% confiabilidad	
$N_f =$	1.69E+09
Compañía Shell 85% confiabilidad	
$N_f =$	5.32E+08
Compañía Shell 95% confiabilidad	
$N_f =$	2.88E+08
Instituto del asfalto	
$N_f =$	2.60E+08

Nota: Elaboración propia

Figura 86.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución



Nota: Elaboración propia

Tabla 100.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 4.87E+07$

Compañía Shell

$N_f = 7.52E+10$

Nota: Elaboración propia

Tabla 101.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

Nf= 1.34E+09

Compañía Shell 85% confiabilidad

Nf= 4.24E+08

Compañía Shell 95% confiabilidad

Nf= 2.30E+08

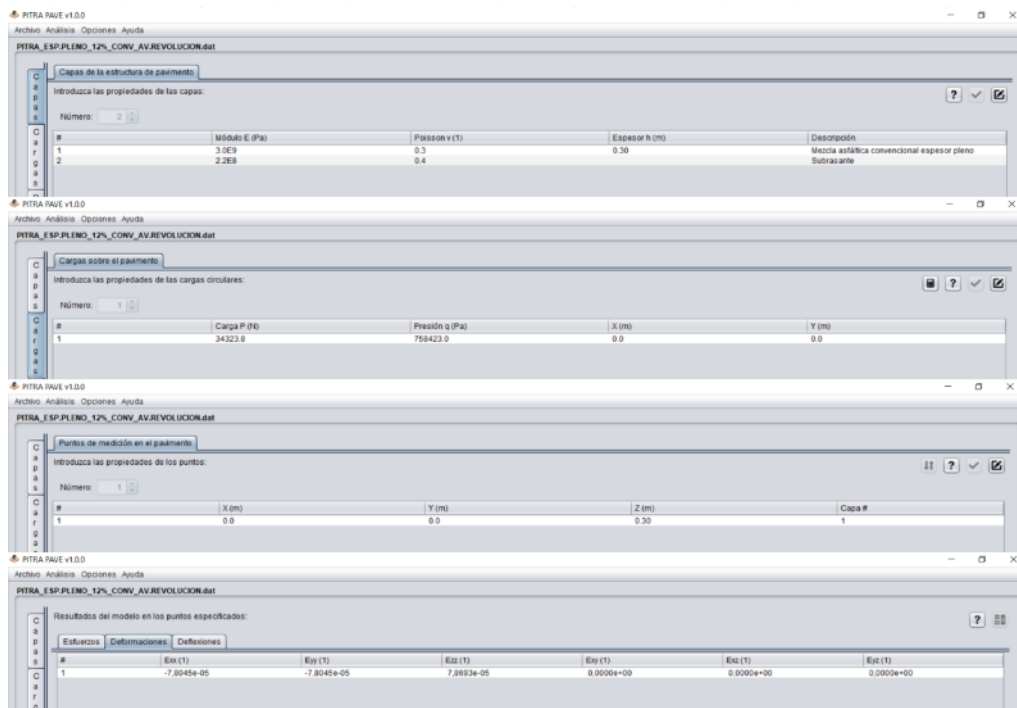
Instituto del asfalto

Nf= 2.01E+08

Nota: Elaboración propia

Figura 87.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Revolución



Nota: Elaboración propia

Tabla 102.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, $VHD=12\%$ IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 2.82E+09$

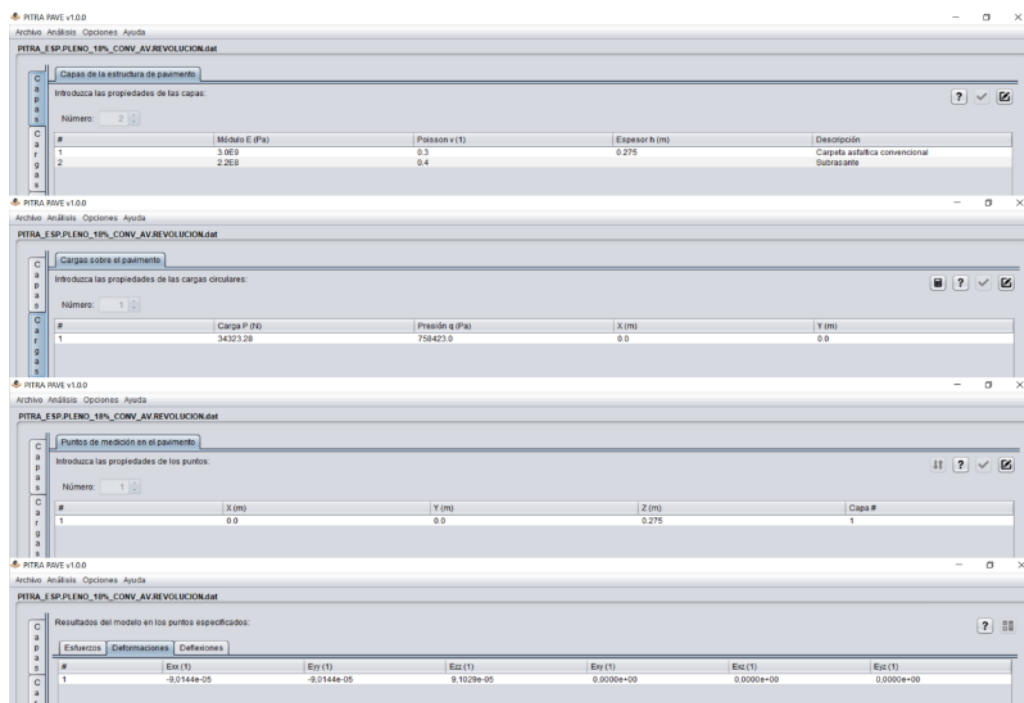
Compañía Shell

$N_f = 8.20E+13$

Nota: Elaboración propia

Figura 88.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, $VHD=18\%$ IMD de la Av. Revolución



Nota: Elaboración propia

Tabla 103.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

Nf= 1.75E+09

Compañía Shell

Nf= 3.62E+13

Nota: Elaboración propia

4.3.4.3 Fatiga y ahuellamiento en Av. Central

Figura 89.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central

The figure displays four screenshots of the PITRA PAVE v1.0.0 software interface, showing the input data for pavement design.

Screenshot 1: Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	3.0E9	0.3	0.14	Carpetita asfáltica convencional
2	3.1E9	0.35	0.3	Baza hidráulica
3	3.1E9	0.35	0.3	Baza hidráulica
4	2.2E9	0.4		Subrasante

Screenshot 2: Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.29	750423.0	0.0	0.0

Screenshot 3: Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.14	1
2	0.0	0.0	0.74	3

Screenshot 4: Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	E _{x1} (1)	E _{y1} (1)	E _{z1} (1)	E _{x2} (1)	E _{y2} (1)	E _{z2} (1)
1	-1.9821e-04	-1.9821e-04	2.1815e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-3.7734e-05	-3.7734e-05	8.1349e-05	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 104.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 1.31E+08$

Compañía Shell

$N_f = 4.15E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 105.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

$N_f = 1.40E+10$

Compañía Shell 85% confiabilidad

$N_f = 4.43E+09$

Compañía Shell 95% confiabilidad

$N_f = 2.40E+09$

Instituto del asfalto

$N_f = 2.78E+09$

Nota: Elaboración propia

Figura 90.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central

The figure displays four screenshots of the PITRA PAVE v1.0.0 software interface, showing the input data for pavement design.

Screenshot 1: Capas de la estructura de pavimento

Introduzca las propiedades de las capas:

Número: 4

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	3.0E9	0.3	0.13	Carpetita asfáltica convencional
2	3.1E8	0.35	0.25	Base estabilizada con cemento
3	3.1E8	0.35	0.25	Base hidráulica
4	2.2E9	0.4		Subrasante

Screenshot 2: Cargas sobre el pavimento

Introduzca las propiedades de las cargas circulares:

Número: 1

#	Carga P (kN)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	768423.0	0.0	0.0

Screenshot 3: Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 2

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.13	1
2	0.0	0.0	0.83	3

Screenshot 4: Resultados del modelo en los puntos especificados

Estados: Deformaciones

#	Ex (1)	Ey (1)	Ez (1)	Ex (1)	Ey (1)	Ez (1)
1	-2.1413e-04	-2.1413e-04	2.3582e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-5.0164e-05	-5.0164e-05	1.0843e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 106.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 1.02E+08$

Compañía Shell

$N_f = 2.68E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 107.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

Nf= 4.45E+09

Compañía Shell 85% confiabilidad

Nf= 1.40E+09

Compañía Shell 95% confiabilidad

Nf= 7.60E+08

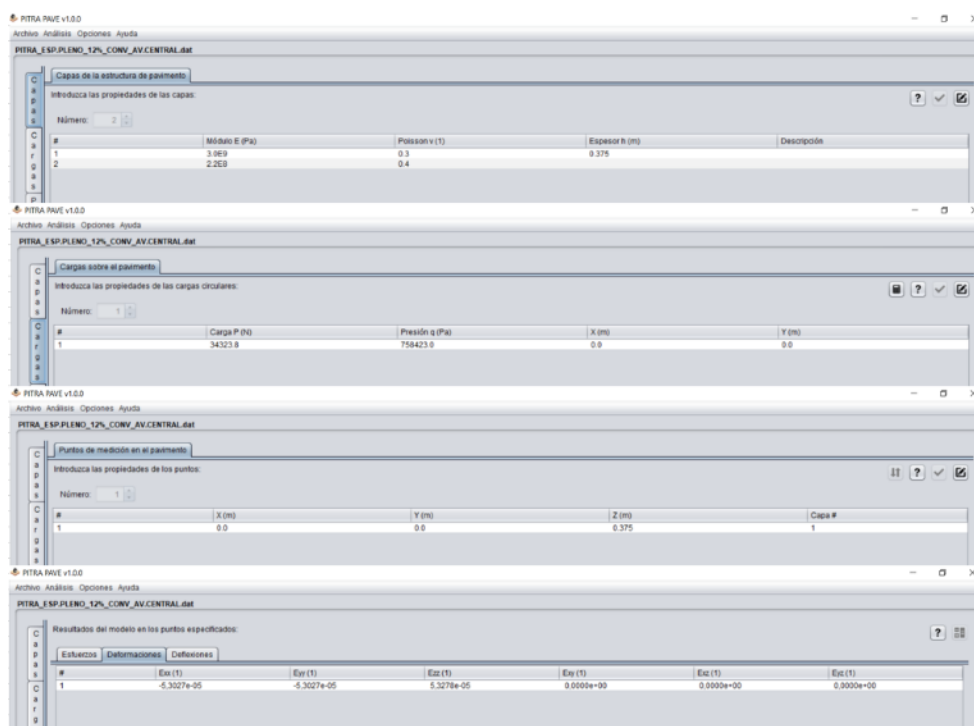
Instituto del asfalto

Nf= 7.69E+08

Nota: Elaboración propia

Figura 91.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central



Nota: Elaboración propia

Tabla 108.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=12%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 1.00E+10$

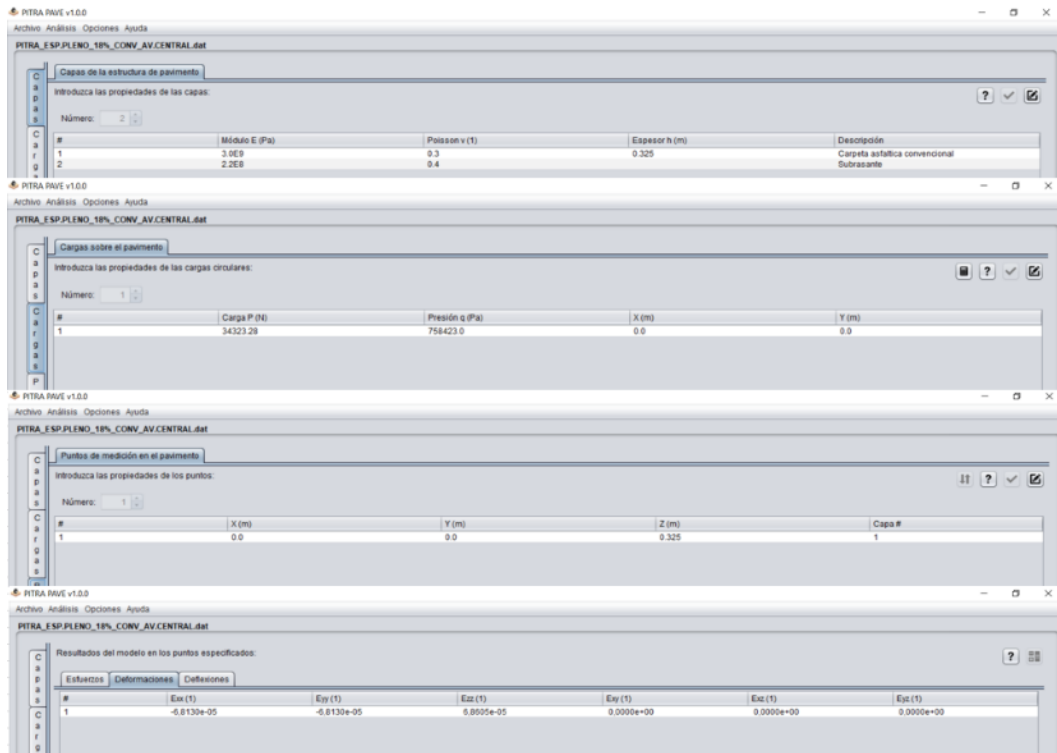
Compañía Shell

$N_f = 7.34E+14$

Nota: Elaboración propia

Figura 92.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central



Nota: Elaboración propia

Tabla 109.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno convencional, VHD=18%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

Nf= 4.40E+09

Compañía Shell

Nf= 1.77E+14

Nota: Elaboración propia

4.3.4.4 Espesor de carpeta asfáltica modificada que no falla por fatiga y ahuellamiento en Av. Revolución

Figura 93.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Revolución

Capas de la estructura de pavimento

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (t)	Espeor h (m)	Descripción
1	5.0E9	0.2	0.025	Carpeta asfáltica con asfalto modificado
2	3.1E8	0.35	0.25	Base hidráulica
3	3.1E8	0.35	0.25	Base hidráulica
4	2.2E8	0.4	0.2	Subrasante

Cargas sobre el pavimento

#	Carga P (kg)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	758423.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.025	1
2	0.0	0.0	0.475	3

Resultados del modelo en los puntos especificados

#	Exx (t)	Eyy (t)	Ezz (t)	Exy (t)	Eyz (t)	Exz (t)
2	-1.3111e-04	-1.0168e-04	2.2999e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 110.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con $e=2.5\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\%$ IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_c^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$$N_f = 9.56\text{E}+07$$

Compañía Shell

$$N_f = 1.53\text{E}+11$$

Nota: Elaboración propia

Tabla 111.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con $e=2.5\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\%$ IMD de la Av. Revolución

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

$$N_d = 2.72\text{E}+08$$

Compañía Shell 85% confiabilidad

$$N_d = 8.59\text{E}+07$$

Compañía Shell 95% confiabilidad

$$N_d = 4.65\text{E}+07$$

Instituto del asfalto

$$N_d = 3.37\text{E}+07$$

Nota: Elaboración propia

Figura 94.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución

Capas de la estructura de pavimento

#	Módulo E (Pa)	Poisson v(1)	Esesor h (m)	Descripción
1	5.0E9	0.2	0.025	Carpeta asfáltica con asfalto modificado
2	310000000	0.35	0.25	Base hidráulica
3	310000000	0.35	0.25	Base hidráulica
4	2.2E9	0.4	0.2	Subrasante

Cargas sobre el pavimento

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	758423.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.025	1
2	0.0	0.0	0.475	3

Resultados del modelo en los puntos especificados:

#	Ex (1)	Ey (1)	Ez (1)	Ex (1)	Ey (1)	Ez (1)
1	-1.0111e-04	-1.0111e-04	2.2999e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-1.0108e-04	-1.0108e-04	2.1802e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 112.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 9.56E+07$

Compañía Shell

$N_f = 1.53E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 113.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con $e=2.5\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=18\% \text{ IMD}$ de la Av. Revolución

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

$N_f = 2.72\text{E}+08$

Compañía Shell 85% confiabilidad

$N_f = 8.59\text{E}+07$

Compañía Shell 95% confiabilidad

$N_f = 4.65\text{E}+07$

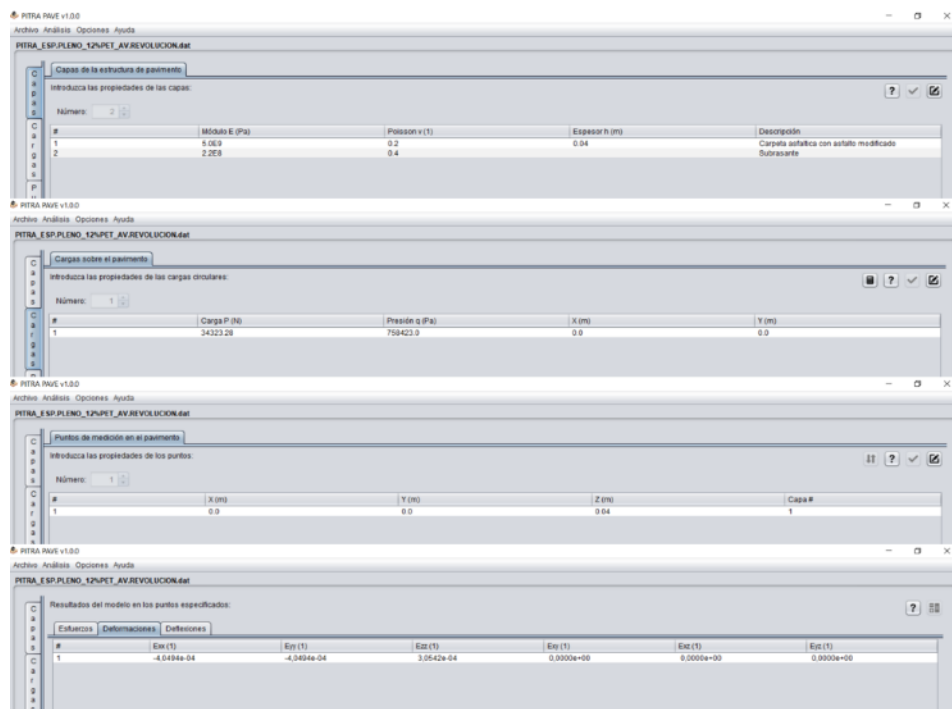
Instituto del asfalto

$N_f = 3.37\text{E}+07$

Nota: Elaboración propia

Figura 95.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de $e=4\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\% \text{ IMD}$ de la Av. Revolución



Nota: Elaboración propia

Tabla 114.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno con $e=4\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\%$ IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_1^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 8.07\text{E}+06$

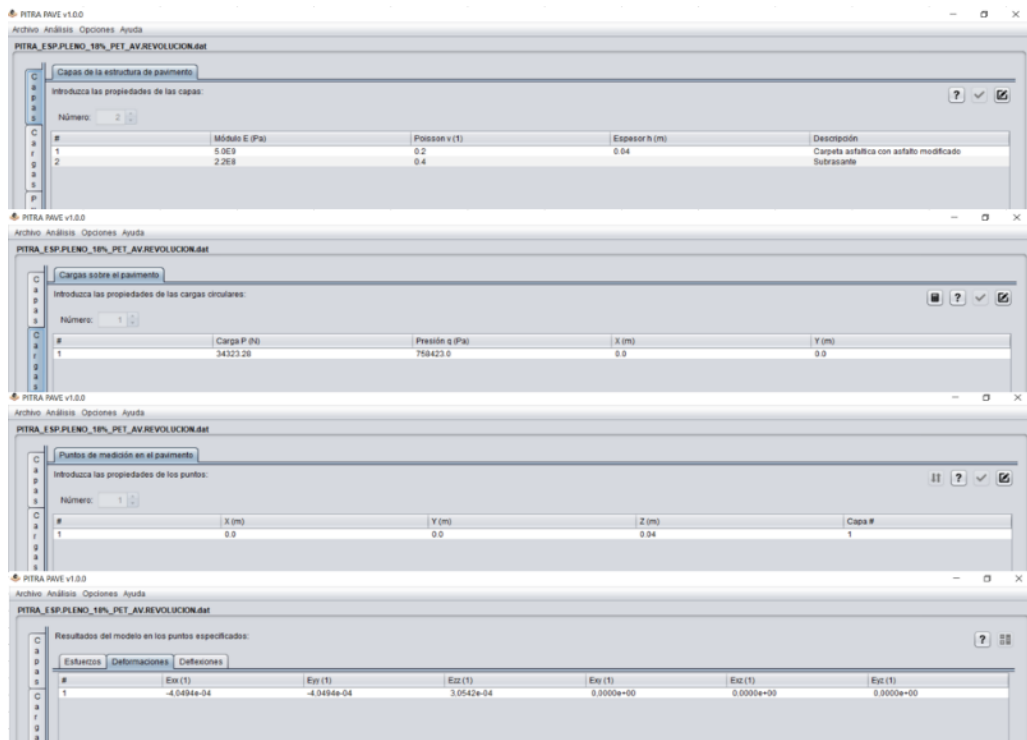
Compañía Shell

$N_f = 2.16\text{E}+09$

Nota: Elaboración propia

Figura 96.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de $e=4\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=18\%$ IMD de la Av. Revolución



Nota: Elaboración propia

Tabla 115.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno con $e=4\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=18\%$ IMD de la Av. Revolución

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_1^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 8.07\text{E}+06$

Compañía Shell

$N_f = 2.16\text{E}+09$

Nota: Elaboración propia

4.3.4.5 Espesor de carpeta asfáltica modificada que no falla por fatiga y ahuellamiento en Av. Central

Figura 97.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con $e=2.5\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\%$ IMD de la Av. Central

Capas de la estructura de pavimento

#	Módulo E (Pa)	Poisson ν (t)	Espesor h (m)	Descripción
1	5.0E9	0.2	0.025	Carpeta asfáltica con asfalto modificado
2	3.1E9	0.35	0.3	Base hidráulica
3	3.1E9	0.35	0.3	Base hidráulica
4	2.2E9	0.4		Subrasante

Cargas sobre el pavimento

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.29	758423.0	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.025	1
2	0.0	0.0	0.625	3

Resultados del modelo en los puntos especificados

#	Esfuerzos	Deformaciones	Deflexiones	ε_{xx} (t)	ε_{yy} (t)	ε_{zz} (t)	ε_{xy} (t)	ε_{yz} (t)	ε_{xz} (t)
1				-1.9188e-04	-1.9188e-04	2.3040e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2				-6.1362e-05	-6.1362e-05	1.3122e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 116.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \epsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

Nf= 9.43E+07

Compañía Shell

Nf= 1.49E+11

Nota: Elaboración propia

Tabla 117.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=12%IMD de la Av. Central

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

Nf= 2.07E+09

Compañía Shell 85% confiabilidad

Nf= 6.54E+08

Compañía Shell 95% confiabilidad

Nf= 3.54E+08

Instituto del asfalto

Nf= 3.27E+08

Nota: Elaboración propia

Figura 98.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central

Capas de la estructura de pavimento

#	Módulo E (Pa)	Poisson v(1)	Espesor h (m)	Descripción
1	5.0E9	0.2	0.025	Carpeta asfáltica con asfalto modificado
2	3.1E9	0.35	0.25	Base hidráulica
3	3.1E9	0.35	0.25	Base hidráulica
4	2.2E9	0.4		Subrasante

Cargas sobre el pavimento

#	Carga P (N)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	758423.9	0.0	0.0

Puntos de medición en el pavimento

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.025	1
2	0.0	0.0	0.525	3

Resultados del modelo en los puntos especificados

#	E _{xx} (1)	E _{yy} (1)	E _{zz} (1)	E _{xy} (1)	E _{xz} (1)	E _{yz} (1)
1	-1.9130e-04	-1.9130e-04	2.3013e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
2	-8.4817e-05	-8.4817e-05	1.8162e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 118.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor con e=2.5cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 9.51E+07$

Compañía Shell

$N_f = 1.51E+11$

Nota: Elaboración propia

Tabla 119.

Número de repeticiones admisibles para el diseño de pavimento con espesor con $e=2.5\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=18\% \text{ IMD}$ de la Av. Central

Modelos de deformación permanente

$$N_d = f_4 \epsilon \cdot e^{-f_5} \quad (4.5)$$

Compañía Shell 50% confiabilidad

Nf= 5.65E+08

Compañía Shell 85% confiabilidad

Nf= 1.78E+08

Compañía Shell 95% confiabilidad

Nf= 9.65E+07

Instituto del asfalto

Nf= 7.64E+07

Nota: Elaboración propia

Figura 99.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de $e=8\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\% \text{ IMD}$ de la Av. Central

The figure displays four sequential screenshots of the PITRA PAVE v1.0.0 software interface, showing the input and output of pavement design calculations.

Screenshot 1: Capas de la estructura de pavimento
 This screen shows the input for the pavement structure layers. The table below represents the data entered:

#	Módulo E (Pa)	Poisson v(1)	Espesor h (m)	Descripción
1	5.0E9	0.2	0.08	Carpeta asfáltica con asfalto modificado
2	2.2E9	0.4		Subrasante

Screenshot 2: Cargas sobre el pavimento
 This screen shows the input for the loads on the pavement. The table below represents the data entered:

#	Carga P (kN)	Presión q (Pa)	X (m)	Y (m)
1	34323.28	756423.0	0.0	0.0

Screenshot 3: Puntos de medición en el pavimento
 This screen shows the input for the measurement points on the pavement. The table below represents the data entered:

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0.0	0.0	0.08	1

Screenshot 4: Resultados del modelo en los puntos especificados
 This screen shows the results of the model at the specified points. The table below represents the output data:

#	E _x (1)	E _y (1)	E _z (1)	E _x (1)	E _y (1)	E _z (1)
1	-3.5340e-04	-3.5340e-04	2.6201e-04	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

Nota: Elaboración propia

Tabla 120.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno de $e=8\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=12\% \text{ IMD}$ de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 2.09\text{E}+07$

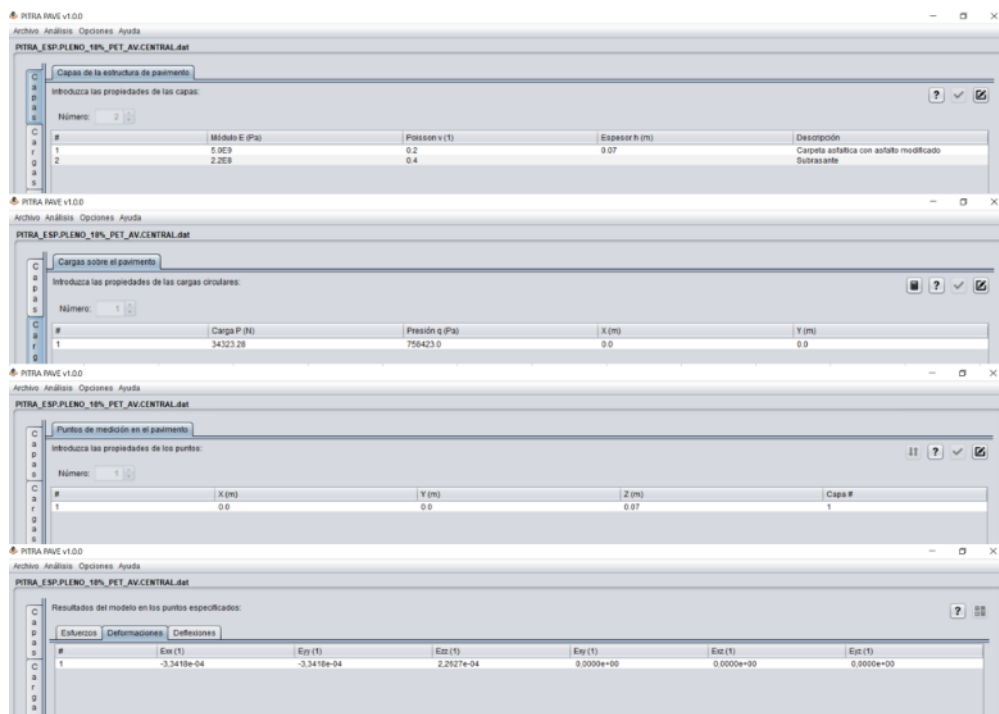
Compañía Shell

$N_f = 1.11\text{E}+10$

Nota: Elaboración propia

Figura 100.

Cálculo de deformaciones con el Software PITRA PAVE para el diseño de pavimento con espesor pleno de $e=7\text{cm}$ de carpeta asfáltica modificada, $VHD=18\% \text{ IMD}$ de la Av. Central



Nota: Elaboración propia

Tabla 121.

Número de repeticiones permisibles para el diseño de pavimento con espesor pleno de e=7cm de carpeta asfáltica modificada, VHD=18%IMD de la Av. Central

Modelos de fracturamiento por fatiga

$$N_f = f_1 \varepsilon_i^{-f_2} \quad (4.4)$$

Instituto del Asfalto

$N_f = 1.52E+07$

Compañía Shell

$N_f = 6.42E+09$

Nota: Elaboración propia

En nuestro caso se hizo el ejercicio para el espesor de 2.5 cm de carpeta asfáltica modificada tanto para la Av. Revolución y Av. Central para ambos volúmenes de tráfico obtenidos. Asimismo, se determinó los espesores plenos con asfalto modificado que cumplan con los modelos, para la Av. Revolución se obtuvo un espesor pleno de 4 cm de carpeta asfáltica modificada para ambas relaciones, VHD=12%IMD y VHD=18%IMD. Por otro lado, para la Av. Central se obtuvo un espesor pleno de 8 cm de carpeta asfáltica modificada para la relación VHD=12%IMD y 7 cm de carpeta asfáltica modificada para la relación VHD=18%IMD.

4.3.5 Análisis de Precios Unitarios (APU) de diseño de mezcla asfáltica

Se realizó el Análisis de Precios Unitarios para la carpeta de mezcla asfáltica obtenidas del diseño con el Método AASHTO 93 y espesores plenos según la carta de diseño del Instituto del Asfalto. Asimismo, los Análisis de Precios Unitarios de las carpetas asfálticas con 2.46% de PET que cumple el límite de porcentaje de vacíos especificadas en el Manual de Carreteras, Especificaciones Técnicas Generales para construcción EG – 2013, además, de las mezclas asfálticas modificadas obtenidas de los modelos de diseño del Instituto del Asfalto y el modelo de la Compañía Shell. Se consideró la revista Constructivo del mes de setiembre del 2024 como referencia.

Tabla 122.

APU de carpeta asfáltica e=11cm obtenido de diseño AASHTO 93 para VHD=12%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL e=11cm VHD=12%IMD						
Partida	RENDIMIENTO:		25 m2/día			
Código	Descripción Recurso	Unid ad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0326	61.86	2.02
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0577	38.14	2.20
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0020	7.35	0.01
						4.23
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 123.

APU de carpeta asfáltica e=30cm obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para VHD=12%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL ESPESOR PLENO e=30cm VHD=12%IMD						
Partida	RENDIMIENTO:		25 m2/día			
Código	Descripción Recurso	Unid ad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0889	61.86	5.50
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.1574	38.14	6.00
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0055	7.35	0.04
						11.54
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 124.

APU de carpeta asfáltica modificada e=2.5cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para VHD=12%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% e=2.5cm VHD=12%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unidad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0001	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0074	61.86	0.46
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0130	38.14	0.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0005	7.35	0.00
						0.96
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 125.

APU de carpeta asfáltica modificada e=4cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para VHD=12%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% ESPESOR PLENO MÍNIMO e=4cm VHD=12%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unidad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0001	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0118	61.86	0.73
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0208	38.14	0.79
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0007	7.35	0.01
						1.53
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 126.

APU de carpeta asfáltica e=10cm obtenido de diseño AASHTO 93 para VHD=18%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL e=10cm VHD=18%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:		25 m ² /día			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Costo unitario directo por:	m ²	19.45	
			cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m ³		0.0296	61.86	1.83
0213010001	AGREGADO FINO	m ³		0.0525	38.14	2.00
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0018	7.35	0.01
						3.85
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 127.

APU de carpeta asfáltica e=27.5cm obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para VHD=18%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL ESPESOR PLENO e=27.5cm VHD=18%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:		25 m ² /día			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Costo unitario directo por:	m ²	26.19	
			cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m ³		0.0815	61.86	5.04
0213010001	AGREGADO FINO	m ³		0.1443	38.14	5.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0050	7.35	0.04
						10.58
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 128.

APU de carpeta asfáltica modificada e=2.5cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para VHD=18%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% e=2.5cm VHD=18%IMD						
Partida		RENDIMIENTO:		25 m2/día		
				Costo unitario directo por:		m2
						16.56
Código	Descripción Recurso		Unid ad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
Parcial S/.						
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	0.3200	27.14
0101010005	PEON		hh	1.0000	0.3200	19.31
						14.86
Materiales						
0207020000	PET		cm3		0.0001	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO		m3		0.0074	61.86
0213010001	AGREGADO FINO		m3		0.0130	38.14
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70		gal		0.0005	7.35
						0.96
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales		%		5.0000	14.86
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 129.

APU de carpeta asfáltica modificada e=4cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para VHD=18%IMD de Av. Revolución

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% ESPESOR PLENO MÍNIMO e=4cm VHD=18%IMD						
Partida		RENDIMIENTO:		25 m2/día		
				Costo unitario directo por:		m2
						17.14
Código	Descripción Recurso	Unid ad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0001	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0118	61.86	0.73
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0208	38.14	0.79
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0007	7.35	0.01
						1.53
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Para los diseños de la Av. Revolución el precio por m2 de la mezcla asfáltica e=11 cm es S/ 19.84 en comparación a la carpeta asfáltica modificada e=2.5 cm obtenida de los

modelos de Instituto del Asfalto y Compañía Shell con un precio por m² de S/ 16.56, ambas para la relación VHD=12%IMD, lo cual el uso de asfalto modificado disminuye en un 16.53% el precio por m². Para la relación VHD=18%IMD el precio por m² de la mezcla asfáltica e=10cm es S/ 19.45 en comparación con el espesor e=2.5cm obtenido de los modelos por fatiga y ahuellamiento con precio unitario de S/ 16.56, esto disminuye en 14.86% con respecto a la mezcla asfáltica convencional. El precio por m² del espesor pleno e=30cm para la relación VHD=12%IMD es S/ 27.15 frente a los S/ 17.14 del espesor pleno e=4cm, esto reduce en un 36.87% el precio por m² con respecto a la mezcla asfáltica convencional. Para la relación VHD=18%IMD el precio del espesor pleno e=27.5cm es S/ 26.19 frente al precio del espesor pleno e=4cm S/ 17.14 obtenido con los modelos de fatiga y ahuellamiento, esto reduce en un 34.56% el precio unitario.

Tabla 130.

APU de carpeta asfáltica e=14cm obtenido de diseño AASHTO 93 para VHD=12%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios							
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL e=14cm VHD=12%IMD					
Partida	RENDIMIENTO:		25 m2/dia				
				Costo unitario directo por: m2		20.99	
Código	Descripción Recurso		Unid ad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO		hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON		hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
							14.86
Materiales							
0207020001	AGREGADO GRUESO		m3		0.0415	61.86	2.57
0213010001	AGREGADO FINO		m3		0.0734	38.14	2.80
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70		gal		0.0025	7.35	0.02
							5.39
Equipos							
0301340001	Herramientas manuales		%		5.0000	14.86	0.74
							0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 131.

APU de carpeta asfáltica e=37.5cm obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para VHD=12%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL ESPESOR PLENO e=37.5cm VHD=12%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Costo unitario directo por:	m2	30.03	
		cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.1111	61.86	6.87
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.1967	38.14	7.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0068	7.35	0.05
						14.43
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 132.

APU de carpeta asfáltica modificada e=2.5cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para VHD=12%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% e=2.5cm VHD=12%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Costo unitario directo por:	m2	16.56	
		cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0001	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0074	61.86	0.46
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0130	38.14	0.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0005	7.35	0.00
						0.96
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 133.

APU de carpeta asfáltica modificada e=8cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para VHD=12%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% ESPESOR PLENO MÍNIMO e=8cm VHD=12%IMD						
Partida	RENDIMIENTO:		25 m2/día			
Código	Descripción Recurso	Unidad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0002	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0236	61.86	1.46
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0417	38.14	1.59
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0015	7.35	0.01
						3.06
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 134.

APU de carpeta asfáltica e=13cm obtenido de diseño AASHTO 93 para VHD=18%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL e=13cm VHD=18%IMD						
Partida	RENDIMIENTO:		25 m2/día			
Código	Descripción Recurso	Unidad	cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0385	61.86	2.38
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0682	38.14	2.60
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0024	7.35	0.02
						5.00
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 135.

APU de carpeta asfáltica e=32.5cm obtenido de carta de diseño del Instituto del asfalto para espesor pleno para VHD=18%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL ESPESOR PLENO e=32.5cm VHD=18%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unid ad	Costo unitario directo por: m2	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0963	61.86	5.96
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.1705	38.14	6.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0059	7.35	0.04
						12.50
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 136.

APU de carpeta asfáltica modificada e=2.5cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para VHD=18%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios						
Presupuest	1002001	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% e=2.5cm VHD=18%IMD				
Partida	RENDIMIENTO:	25 m2/día				
Código	Descripción Recurso	Unid ad	Costo unitario directo por: m2	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.
Mano de Obra						
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	27.14	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	19.31	6.18
						14.86
Materiales						
0207020000	PET	cm3		0.0001	0.00	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0074	61.86	0.46
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0130	38.14	0.50
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0005	7.35	0.00
						0.96
Equipos						
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	14.86	0.74
						0.74

Nota: Elaboración propia

Tabla 137.

APU de carpeta asfáltica modificada e=7cm obtenido de modelos del Instituto del Asfalto y Compañía Shell para espesor pleno para VHD=18%IMD de Av. Central

Análisis de precios unitarios					
Presupuest 1002001 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA 2.46% ESPESOR PLENO MÍNIMO e=7cm VHD=18%IMD					
Partida	RENDIMIENTO: 25 m2/día		Costo unitario directo por: m2		
Código	Descripción Recurso	Unidad	cuadrilla	Cantidad	Parcial S/.
Mano de Obra					
0101010003	OPERARIO	hh	1.0000	0.3200	8.68
0101010005	PEON	hh	1.0000	0.3200	6.18
					14.86
Materiales					
0207020000	PET	cm3		0.0002	0.00
0207020001	AGREGADO GRUESO	m3		0.0206	1.28
0213010001	AGREGADO FINO	m3		0.0365	1.39
0213020002	CEMENTO ASFÁLTICO PEN 60/70	gal		0.0013	0.01
					2.68
Equipos					
0301340001	Herramientas manuales	%		5.0000	0.74
					0.74

Nota: Elaboración propia

Para los diseños de la Av. Central el precio por m2 de la mezcla asfáltica e=14 cm es S/ 20.99 en comparación a la carpeta asfáltica modificada e=2.5 cm obtenida de los modelos de Instituto del Asfalto y Compañía Shell con un precio por m2 de S/ 16.56, ambas para la relación VHD=12%IMD, lo cual el uso de asfalto modificado disminuye en un 21.11% el precio por m2. Para la relación VHD=18%IMD el precio por m2 de la mezcla asfáltica e=13cm es S/ 20.61 en comparación con el espesor e=2.5cm obtenido de los modelos por fatiga y ahuellamiento con precio unitario de S/ 16.56, esto disminuye en 19.65% con respecto a la mezcla asfáltica convencional. El precio por m2 del espesor pleno e=37.5cm para la relación VHD=12%IMD es S/ 30.03 frente a los S/ 18.66 del espesor pleno e=8cm, esto reduce en un 37.86% el precio por m2 con respecto a la mezcla asfáltica convencional. Para la relación VHD=18%IMD el precio del espesor pleno e=32.5cm es S/ 28.11 frente al precio del espesor pleno e=7cm S/ 18.28 obtenido con los modelos de fatiga y ahuellamiento, esto reduce en un 34.97% el precio unitario.

A continuación, se muestra los cuadros comparativos de los diseños de pavimento y costos de la mezcla asfáltica.

Tabla 138.**Cuadro comparativo de diseño de pavimento de Av. Revolución**

Método/Modelo de diseño	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
VHD=12%IMD		
Método AASHTO 93		
Modelo por fatiga y ahuellamiento		
	Carpeta asfáltica = 11 cm	
	Base = 25 cm	Carpeta asfáltica = 2.5 cm
Modelo Shell / Instituto del Asfalto	Subbase = 20 cm	Base = 25 cm
		Subbase = 20 cm
VHD=18%IMD		
Método AASHTO 93		
Modelo por fatiga y ahuellamiento		
	Carpeta asfáltica = 10 cm	
	Base = 25 cm	Carpeta asfáltica = 2.5 cm
Modelo Shell / Instituto del Asfalto	Subbase = 20 cm	Base = 25 cm
		Subbase = 20 cm
ESPESOR PLENO VHD=12%IMD		
Carta del Instituto del Asfalto		
Modelo por fatiga y ahuellamiento	Carpeta asfáltica = 30 cm	
Modelo Shell / Instituto del Asfalto		Carpeta asfáltica = 4 cm
ESPESOR PLENO VHD=18%IMD		
Carta del Instituto del Asfalto		
Modelo por fatiga y ahuellamiento	Carpeta asfáltica = 27.5 cm	
Modelo Shell / Instituto del Asfalto		Carpeta asfáltica = 4 cm

Nota: Elaboración propia

Tabla 139.**Cuadro comparativo de diseño de pavimento de Av. Central**

Método/Modelo de diseño	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
VHD=12%IMD		
Método AASHTO 93		
Modelo por fatiga y ahuellamiento		
	Carpeta asfáltica = 14 cm	
	Base = 30 cm	Carpeta asfáltica = 2.5 cm
Modelo Shell / Instituto del Asfalto	Subbase = 30 cm	Base = 30 cm
		Subbase = 30 cm
VHD=18%IMD		
Método AASHTO 93		
Modelo por fatiga y ahuellamiento		
	Carpeta asfáltica = 13 cm	
	Base = 25 cm	Carpeta asfáltica = 2.5 cm
Modelo Shell / Instituto del Asfalto	Subbase = 25 cm	Base = 25 cm
		Subbase = 25 cm
ESPESOR PLENO VHD=12%IMD		
Carta del Instituto del Asfalto		
Modelo por fatiga y ahuellamiento	Carpeta asfáltica = 37.5 cm	
Modelo Shell / Instituto del Asfalto		Carpeta asfáltica = 8 cm
ESPESOR PLENO VHD=18%IMD		
Carta del Instituto del Asfalto		
Modelo por fatiga y ahuellamiento	Carpeta asfáltica = 32.5 cm	
Modelo Shell / Instituto del Asfalto		Carpeta asfáltica = 7 cm

Nota: Elaboración propia

Tabla 140.*Cuadro comparativo de precio por m2 de mezcla asfáltica de Av. Revolución*

Diseño	Precio por m2	
	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
VHD=12%IMD		
Carpeta asfáltica e=11cm	S/ 19.84	
Carpeta asfáltica e=2.5cm		S/ 16.56
VHD=18%IMD		
Carpeta asfáltica e=10cm	S/ 19.45	
Carpeta asfáltica e=2.5cm		S/ 16.56
ESPESOR PLENO VHD=12%IMD		
Carpeta asfáltica e=30cm	S/ 27.15	
Carpeta asfáltica e=4cm		S/ 17.14
ESPESOR PLENO VHD=18%IMD		
Carpeta asfáltica e=27.5cm	S/ 26.19	
Carpeta asfáltica e=4cm		S/ 17.14

Nota: Elaboración propia

Tabla 141.*Cuadro comparativo de precio por m2 de mezcla asfáltica de Av. Central*

Diseño	Precio por m2	
	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
VHD=12%IMD		
Carpeta asfáltica e=14cm	S/ 20.99	
Carpeta asfáltica e=2.5cm		S/ 16.56
VHD=18%IMD		
Carpeta asfáltica e=13cm	S/ 20.61	
Carpeta asfáltica e=2.5cm		S/ 16.56
ESPESOR PLENO VHD=12%IMD		
Carpeta asfáltica e=37.5cm	S/ 30.03	
Carpeta asfáltica e=8cm		S/ 18.66
ESPESOR PLENO VHD=18%IMD		
Carpeta asfáltica e=32.5cm	S/ 28.11	
Carpeta asfáltica e=7cm		S/ 18.28

Nota: Elaboración propia

De las tablas 138, 139, 140 y 141 se puede observar que, utilizando los métodos de fatiga y ahuellamiento para comprobar los diseños con los volúmenes de tráfico, se pueden obtener espesores menores de mezcla asfáltica modificada a los obtenidos con el método AASHTO 93, por ende, el precio por m2 puede variar desde un 15% hasta un 37% dependiendo del diseño realizado.

Conclusiones

- El diseño de una mezcla asfáltica con la incorporación de PET mejoró sus propiedades mecánicas en vías colectoras urbanas.
- Para poder realizar las comparaciones del comportamiento de la mezcla propuesta se realizó los ensayos de una muestra patrón, en consecuencia, el contenido óptimo del cemento asfáltico en la mezcla asfáltica convencional es 6.1%. La estabilidad Marshall obtenida es 1470.563 kgf, un flujo de 4.17 mm y un porcentaje de vacíos de 4.033%.
- El diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de PET mejoró la propiedad de estabilidad Marshall. Para un porcentaje de vacíos del 5%, recomendado, se incorporó un 2.46% de PET en relación al peso del cemento asfáltico, alcanzando una estabilidad de 1471.692 kgf, lo que representa un 100.077% respecto a la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional. La estabilidad máxima se obtuvo con un porcentaje en peso de PET del 4.54% en el cemento asfáltico, alcanzando un valor de 1574.795 kgf, equivalente a un 107.088% en comparación con la mezcla convencional.
- Además, para la mezcla con mayor flujo, la estabilidad fue en función del 5.58% de PET respecto al peso del cemento asfáltico, logrando un valor de 1549.395 kgf, lo que representa un 105.361% en relación a la mezcla convencional. Este incremento en la estabilidad indica una mayor resistencia a las deformaciones provocadas por las cargas del tráfico.
- El diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de PET mejoró la propiedad de flujo Marshall. Para un 2.46% de PET respecto al peso del cemento asfáltico, el valor de flujo obtenido fue de 4.245 mm, lo que representa un 101.799% en comparación con la mezcla asfáltica convencional. Con un 4.54% de PET, el flujo alcanzó los 4.565 mm, equivalente al 109.472% del flujo de la mezcla convencional. Finalmente, para un 5.58% de PET en relación con el peso del cemento asfáltico, el valor máximo de flujo fue de 4.605 mm, lo que corresponde a un 110.432% respecto a la mezcla convencional.
- Este aumento en el flujo indica que la mezcla asfáltica con PET presenta una mayor flexibilidad en comparación con la mezcla convencional.
- El diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de PET mejoró la propiedad del porcentaje de vacíos. Para un 2.46% de PET respecto al cemento asfáltico, se obtuvo un 5% de vacíos, lo que representa un 123.977% del valor de la mezcla convencional. Con un 4.54% de PET, el porcentaje de vacíos fue de 6.206%, equivalente a un 153.88% en comparación con la mezcla convencional. Finalmente, para un 5.58% de PET, el porcentaje de vacíos alcanzó el 6.856%, lo que equivale a un 169.998% del porcentaje de vacíos de la mezcla convencional.

- Este incremento en el porcentaje de vacíos indica que la mezcla con PET posee una mayor capacidad drenante en comparación con la mezcla asfáltica convencional.
- Se realizó un estudio de tráfico en las vías colectoras urbanas Av. Revolución y Av. Central para obtener el Volumen vehicular (IMD). Con dichos valores del IMD se obtuvieron rangos de ejes equivalentes de 5,125,414.38 - 7,688,121.57 EE en la Av. Revolución. En la Av. Central se obtuvo el rango 13,011,575.06 - 19,517,362.58 EE.
- Con el método AASHTO 93 se diseñó el pavimento flexible para la Av. Revolución y Av. Central, y se obtuvo los siguientes espesores, para la Av. Revolución, carpeta asfáltica de 10 – 11 cm, base granular de 25 cm y subbase granular de 20 cm; para la Av. Central una carpeta asfáltica de 13 – 14 cm, base granular de 25 – 30 cm y subbase granular de 25 – 30 cm.
- Por otro lado, se realizó el diseño de espesor pleno del Instituto del Asfalto, para obtener otra referencia comparativa. Para la Av. Revolución una carpeta asfáltica con espesor pleno de 27.5 – 30 cm y para la Av. Central una carpeta asfáltica con espesor pleno de 32.5 – 37.5 cm.

Recomendaciones

- Se recomienda una actualización del manual de diseño de pavimentos que contemple el uso de materiales alternativos reciclados, así como las nuevas metodologías de diseño que se utilizan actualmente, entre ellos, los mecanísticos del AASHTO.
- Se recomienda utilizar e investigar granulometrías variadas para el diseño de mezclas asfálticas y observar el comportamiento de sus propiedades mecánicas con el fin de obtener diseños con mejor desempeño frente a las cargas vehiculares en diferentes tipos de vía, no solo colectoras como el caso de la presente investigación.
- Los métodos convencionales utilizados para el diseño, al ser métodos empíricos se recomienda que sean comparados con los esfuerzos y deformaciones en los puntos donde ocurren las fallas por fatiga y ahuellamiento, en ese sentido, en el subcapítulo 4.3.4.1. se utilizó los valores de los módulos elásticos más desfavorables del Instituto Mexicano para analizarlos en los modelos de esfuerzos y deformaciones. Los resultados obtenidos mediante estos modelos en los escenarios más desfavorables cumplen con el número de ejes equivalentes, es decir, el número de ejes permisibles es mayor a los ejes equivalentes obtenidos en el estudio de tráfico.
- Los datos obtenidos para los diseños de espesores fueron analizados por las metodologías, Shell e Instituto del Asfalto, se procedió a verificar si estos soportan fatiga y ahuellamiento, para ello se utilizó el software PITRA PAVE, como consecuencia se obtuvieron los Número de repeticiones permisibles para la fatiga y el número de repeticiones admisibles para la deformación permanente para los diseños de pavimentos obtenidos con el método AASHTO 93 con el análisis de deformaciones en el software PITRA PAVE. Mediante estos modelos se determinó que los diseños iniciales cumplen con lo requerido para evitar la falla por fatiga en la fibra inferior de la carpeta asfáltica o deformación permanente en fibra superior de la subrasante cuyo procedimiento es recomendable.
- Para el caso de mezclas es recomendable obtener los módulos de elasticidad a diferentes temperaturas mediante ensayos de laboratorio para mayor precisión y se recomienda hacer el análisis de espesores mínimos comparando el tráfico admisible para no llegar a la falla del pavimento. En nuestro caso se realizó un análisis comparativo de costos para obtener otra ventaja, de lo cual se obtuvo que se puede reducir desde un 15% hasta un 37% el precio por m² de carpeta asfáltica.
- Se recomienda adquirir nuevos equipos de laboratorio por parte de la facultad para poder cubrir los requerimientos de las nuevas metodologías que se están dando en la

actualidad que es el caso del diseño mecánico, de tal forma que se abran nuevas líneas de investigación en la tecnología del asfalto.

Referencias bibliográficas

- Alvines Arbaiza, J. F. (2023) *Elaboración de Mezcla Asfáltica Modificada con Botellas Plásticas Recicladas, Aplicando el Método Marshall para Tránsito Pesado* [Tesis de titulación, Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/11077>
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM D2041/D2041M-11 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*.
- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM D3203/D3203M – 11 Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures*.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C127 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C128 – 15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D2726/D2726M-17 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM D3549/D3549M – 18 Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Asphalt Mixture Specimens*.
- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM D6927 – 22 Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*.
- Asphalt Institute. (1991). *MS-1 Thickness Design - Asphalt Pavements for Highways and Streets*.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods Manual Series N°2-7th Edition*.
- Banco Central de Reserva del Perú. (2024). *Resumen Informativo Semanal 22 de agosto de 2024*. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Nota-Semanal/2024/resumen-informativo-2024-08-22.pdf>
- Bernardo Cortez, D. C. y Mendiguri Mendieta, Y. Y. (2022) *Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica usando polímeros Polietilentereftalato* [Tesis de titulación, Universidad Ricardo Palma]. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/5787>

- Camacho Reyes, Y. A., Gómez Espinosa, L. S. y López López, L. J. (2019) *Viabilidad diseño de mezcla asfáltica modificada con 1% de fibra de PET* [Tesis de titulación, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/12256>
- Capcha Camasita, G. I. y Ortega Cabello, A. M. (2023) *Evaluación de la mejora en la resistencia de un depósito de suelo areno limoso con inclusión del PET reciclado para fines de pavimentación en el distrito de Villa El Salvador* [Tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/670245>
- Cavalcanti Cajacuri, J. M. y Hinostraza Abad, I. E. (2022) *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica con adiciones recicladas compuestas de PET en asfalto caliente en el distrito de San Juan de Lurigancho* [Tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/667832>
- Contreras Vizcarra, D. F. y Zúñiga Pinillos, J. M. (2020). *Influencia de los desperdicios plásticos en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas modificadas* [Tesis de titulación, Universidad Ricardo Palma]. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/3686>
- Constructivo (Agosto – Setiembre 2024). *Revista Constructivo N° 172*. <https://constructivo.com/revista/172>
- Corbacho Chipana, J. E. (2019). *Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la ciudad del Cusco-2018* [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/3571>
- Espinoza Japa, S. L. (2019) *Utilización del plástico PET reciclado como agregado ligante para un diseño de mezcla asfáltica en caliente de bajo tránsito en la ciudad de Huánuco-2018* [Tesis de titulación, Universidad Nacional Hermilio Valdizán de Huánuco]. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/4726>
- Farias Osorio, M. A. (2023) *Estudio del impacto de la adición de PET reciclado como reemplazo de agregados en el módulo dinámico de una mezcla asfáltica densa en caliente* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/09795225-b683-403f-be66-05db121537e0/content>

- Garzón, U., Lopera, J. y Chica, D. (2023) *Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas modificadas con PET* [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/52649>
- Gomez Mendoza, R. B. y Matamoros Pineda, A. A. (2022) *Influencia de la cal hidratada en la resistencia de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles en Huancavelica* [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4851>
- Hake, S. L., Damgir, R. M. y Awsarmal, P. R. (2020). Utilization of Plastic waste in Bitumen Mixes for Flexible Pavement. *Transportation Research Procedia*, **48**, 3779-3785. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.041>
- Hernández Durán, H. J. (2023). Diseño de Mezcla Asfáltica elaborada con agregado de polímeros de Tereftalato de Polietileno (PET). *Revista de Investigación*, 1(12), 27-33. <https://doi.org/10.5377/revunivo.v12i12.15752>
- Heydari, S., Hajimohammadi, A., Javadi, N. H. S. y Khalili, N. (2021). The use of plastic waste in asphalt: A critical review on asphalt mix design and Marshall properties. *Construction and Building Materials*. **309**, 125185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125185>
- Instituto Mexicano del Transporte (1998). *Pavimentos flexibles. problemática, metodologías de diseño y tendencias*. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt104.pdf>
- Instituto Mexicano del Transporte (2018). *Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista*. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt72.pdf>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica (2015). *PITRA PAVE (Versión 1.0.0.)* [Software de computador]. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/component/content/article/147-programas/infraestructura-transporte/apps/362-pitra-pave-v1-0-0>
- Lopez Sabogal, J. C. (2020) *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros provenientes de botellas PET recicladas* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38661/LopezSabogalJuanCarlos2021.pdf?sequence=1>

- Ministerio de Economía y Finanzas (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*.
https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/normas/normasv/2015/RD003-2015/Pautas_Pavimentos.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG – 2018*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-02-18%20Dise%C3%B1o%20Geometrico%20DG-2018.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de carreteras, Especificaciones técnicas generales para construcción EG – 2013*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014). *Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_pdf/man_7%20sggp-2014.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *MTC E-205 Gravedad específica y absorción de agregados finos*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *MTC E-206 Peso específico y absorción de agregados gruesos*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *MTC E-504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *MTC E-507 Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas de pavimento asfáltico*.
https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Reglamento Nacional de Vehículos* – Decreto Supremo N° 058- 2003-MTC. <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/terrestre/documentos/REGLAMENTO%20NACIONAL%20DE%20VEHICULOS%20%20actualizado%20al%2023.08.2016.pdf>
- Norma Técnica Peruana NTP 400.043: 2021 (2021). *AGREGADOS. Reducir las muestras de agregados a tamaño de ensayo*
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2010). *CE.010 Pavimentos Urbanos DS N° 010-2010*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2365614/14%20CE.010%20PAVIMIENTOS%20URBANOS%20DS%20N%C2%B0%20010-2010.pdf?v=1636051827>
- Rondón Quintana, H. y Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos, Materiales, Construcción y Diseño*.

Anexos

Anexo 1: Análisis granulométrico de agregados	1
Anexo 2: Gravedad específica y absorción de los agregados	2
Anexo 3: Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica convencional	3
Anexo 4: Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica con PET	5
Anexo 5: Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional	7
Anexo 6: Peso específico máximo teórico RICE de mezcla asfáltica convencional.....	9
Anexo 7: Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con PET	11
Anexo 8: Peso específico máximo teórico RICE de mezcla asfáltica con PET	12

Anexo 1: Análisis granulométrico de agregados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA

PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS

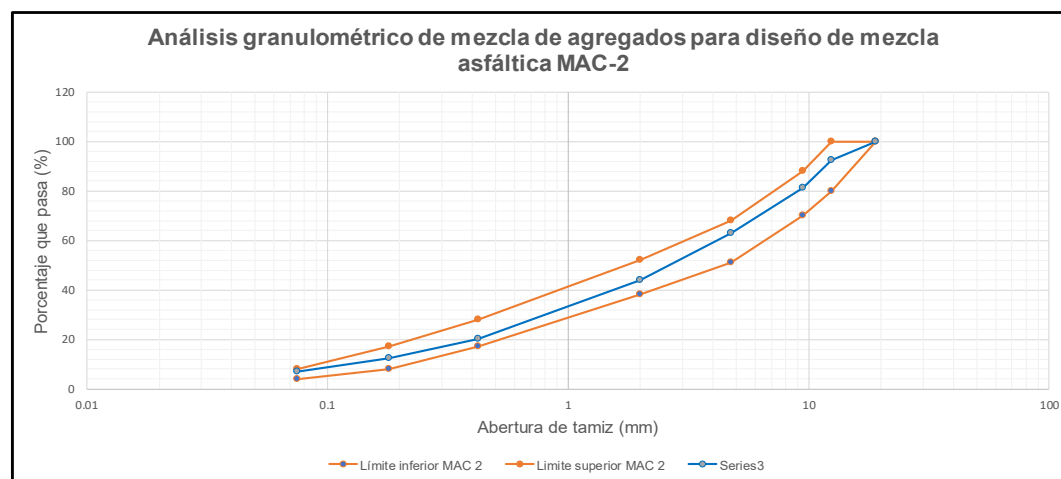
REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO

Agregado grueso: Cantera Global - Carapongo

Agregado fino: Cantera Excalibur - Lurín

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO D2172

Tamiz	Abert. (mm)	Peso retenido (g)		Porcentaje retenido (%)		Porcentaje retenido acumulado (%)		Porcentaje acumulado que pasa(%)		% que pasa MEZCLA		Retenido	MAC 2	
		Ag. grueso	Ag. fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino		Lim. Inf.	Lím. Sup.
										36.00%	64.00%			
										100				
3/4"	19							100.00	100.00	100.00		0.00	100	100
1/2"	12.5	1172		20.93		20.93		79.07	100.00	92.47		7.53	80	100
3/8"	9.5	1746		31.18		52.11		47.89	100.00	81.24		11.22	70	88
N°4	4.75	2319	81	41.41	5.52	93.52	5.52	6.48	94.48	62.80		18.44	51	68
N°10	2	342	383.2	6.11	26.12	99.63	31.64	0.38	68.36	43.88		18.92	38	52
N°40	0.425	8	545.6	0.14	37.19	99.77	68.83	0.23	31.17	20.03		23.85	17	28
N°80	0.18	1	174.7	0.02	11.91	99.79	80.74	0.21	19.26	12.40		7.63	8	17
N°200	0.075	3	121.6	0.05	8.29	99.84	89.03	0.16	10.97	7.08		5.32	4	8
Platillo	0	9	160.9	0.16	10.97	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00		7.08	0	0
		5600	1467									100.00		



MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 2: Gravedad específica y absorción de los agregados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA

PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS

REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO

Agregado grueso: Cantera Global - Carapongo

Agregado fino: Cantera Excalibur - Lurín

Gravedad específica y absorción del agregado grueso (ASTM C127/MTC E206)

AGREGADO GRUESO (ASTM C127/MTC E206)			
A	PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AIRE)	(gr)	1370.2
B	PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AGUA)	(gr)	857.3
C	VOL. DE MASA + VOL. DE VACIOS = A-B	(gr)	512.8
D	PESO MAT. SECO EN ESTUFA (105°C)	(gr)	1359.4
E	VOL. DE MASA = C-(A-D)		502
P.E. BULK (BASE SECA) = D/C			2.651
P.E. BULK (BASE SATURADA) = A/C			2.672
P.E. APARENTE (BASE SECA) = D/E			2.708
% DE ABSORCION = ((A-D)/D)x100			0.794

Gravedad específica y absorción del agregado fino (ASTM C128/MTC E205)

AGREGADO FINO (ASTM C128/MTC E205)			
A	PESO MAT. SAT. SUP. SECA (EN AIRE)	(gr)	500.72
B	PESO FRASCO + H ₂ O	(gr)	670.24
C	PESO FRASCO + H ₂ O + A	(gr)	1170.96
D	PESO DEL MAT. + H ₂ O EN EL FRASCO	(gr)	984.69
E	VOL. DE MASA + VOL. DE VACIO = C-D		186.27
F	PESO MAT. SECO EN ESTUFA (105°C)		495.58
G	VOL. DE MASA = E-(A-F)		181.13
P.E. BULK (BASE SECA) = F/E			2.661
P.E. BULK (BASE SATURADA) = A/E			2.688
P.E. APARENTE (BASE SECA) = F/G			2.736
% DE ABSORCION = ((A-F)/F)x100			1.037

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 3: Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica convencional



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : **BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA**

PROYECTO : **DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS**

REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO

Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica compactada ASTM D3549 / MTC E507

Cemento asfáltico: 5%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.185	10.22	10.185
DIAMETRO 2	(cm)	10.18	10.155	10.195
PROMEDIO	(cm)	10.183	10.188	10.19
ESPESOR 1	(cm)	6.6	6.64	6.575
ESPESOR 2	(cm)	6.59	6.58	6.65
ESPESOR 3	(cm)	6.53	6.61	6.61
ESPESOR 4	(cm)	6.54	6.725	6.555
PROMEDIO	(cm)	6.565	6.639	6.598
MASA TESTIGO	(g)	1195.1	1194.8	1193.4

Cemento asfáltico: 5.5%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.22	10.185	10.195
DIAMETRO 2	(cm)	10.21	10.165	10.18
PROMEDIO	(cm)	10.215	10.175	10.188
ESPESOR 1	(cm)	6.55	6.475	6.485
ESPESOR 2	(cm)	6.485	6.475	6.5
ESPESOR 3	(cm)	6.435	6.55	6.46
ESPESOR 4	(cm)	6.445	6.52	6.44
PROMEDIO	(cm)	6.479	6.505	6.471
MASA TESTIGO	(g)	1192.9	1192.4	1194.2

Cemento asfáltico: 6%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.185	10.195	10.17
DIAMETRO 2	(cm)	10.175	10.185	10.155
PROMEDIO	(cm)	10.18	10.19	10.163
ESPESOR 1	(cm)	6.415	6.425	6.505
ESPESOR 2	(cm)	6.46	6.445	6.5
ESPESOR 3	(cm)	6.415	6.44	6.415
ESPESOR 4	(cm)	6.41	6.395	6.42
PROMEDIO	(cm)	6.425	6.426	6.46
MASA TESTIGO	(g)	1194.3	1193.5	1193.5



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

Cemento asfáltico: 6.5%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.175	10.175	10.195
DIAMETRO 2	(cm)	10.16	10.165	10.19
PROMEDIO	(cm)	10.168	10.17	10.193
ESPEJOR 1	(cm)	6.39	6.45	6.355
ESPEJOR 2	(cm)	6.375	6.46	6.36
ESPEJOR 3	(cm)	6.395	6.41	6.415
ESPEJOR 4	(cm)	6.425	6.395	6.435
PROMEDIO	(cm)	6.396	6.429	6.391
MASA TESTIGO	(g)	1191.7	1194.5	1193.5

Cemento asfáltico: 6.1%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO 1	(cm)	10.16	10.18	10.185
DIAMETRO 2	(cm)	10.16	10.195	10.175
PROMEDIO	(cm)	10.16	10.188	10.18
ESPEJOR 1	(cm)	6.48	6.39	6.51
ESPEJOR 2	(cm)	6.415	6.39	6.57
ESPEJOR 3	(cm)	6.4	6.435	6.52
ESPEJOR 4	(cm)	6.465	6.46	6.485
PROMEDIO	(cm)	6.44	6.419	6.521
MASA TESTIGO	(g)	1195.6	1196.8	1196.3

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 4: Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica con PET



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA
PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS
REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO
 Espesor o altura de briquetas de mezcla asfáltica compactada ASTM D3549 / MTC E507

PET 2%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO	(cm)	10.205	10.18	10.195
DIAMETRO	(cm)	10.21	10.175	10.21
PROMEDIO	(cm)	10.208	10.178	10.203
ESPESOR 1	(cm)	6.44	6.46	6.51
ESPESOR 2	(cm)	6.5	6.51	6.485
ESPESOR 3	(cm)	6.48	6.54	6.47
ESPESOR 4	(cm)	6.435	6.435	6.48
PROMEDIO	(cm)	6.464	6.486	6.486
MASA TESTIGO		1195.9	1194.7	1195.1

PET 4.0%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO	(cm)	10.17	10.18	10.17
DIAMETRO	(cm)	10.175	10.185	10.175
PROMEDIO	(cm)	10.173	10.183	10.173
ESPESOR 1	(cm)	6.44	6.55	6.52
ESPESOR 2	(cm)	6.435	6.54	6.52
ESPESOR 3	(cm)	6.475	6.5	6.46
ESPESOR 4	(cm)	6.485	6.51	6.455
PROMEDIO	(cm)	6.459	6.525	6.489
MASA TESTIGO		1195.1	1195.5	1195.3

PET 6%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO	(cm)	10.22	10.17	10.22
DIAMETRO	(cm)	10.215	10.165	10.22
PROMEDIO	(cm)	10.218	10.168	10.22
ESPESOR 1	(cm)	6.4	6.635	6.485
ESPESOR 2	(cm)	6.49	6.59	6.49
ESPESOR 3	(cm)	6.47	6.6	6.52
ESPESOR 4	(cm)	6.415	6.64	6.54
PROMEDIO	(cm)	6.444	6.616	6.509
MASA TESTIGO		1194.8	1195.7	1195.5



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

PET

8.0%

TESTIGOS		1	2	3
DIAMETRO	(cm)	10.17	10.18	10.19
DIAMETRO	(cm)	10.175	10.17	10.16
PROMEDIO	(cm)	10.173	10.175	10.175
ESPESOR 1	(cm)	6.6	6.625	6.685
ESPESOR 2	(cm)	6.67	6.58	6.635
ESPESOR 3	(cm)	6.635	6.55	6.61
ESPESOR 4	(cm)	6.585	6.59	6.655
PROMEDIO	(cm)	6.623	6.586	6.646
MASA TESTIGO		1195.7	1195.9	1196.7

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 5: Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica convencional



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA
PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS
REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO
 Estabilidad y flujo Marshall ASTM D6927 / MTC E504

Cemento asfáltico: 5%

ESPECIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1195.1	1194.8	1193.4
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	1198.5	1198.7	1198.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	674.5	671.4	671.2
Espesor, mm	65.65	66.39	65.98
Estabilidad Marshall	1698.174	1742.174	1744.174
Flujo Marshall (0.25mm)	3.924	3.694	3.704
Temperatura de Ensayo, °C	15.9	15.9	15.9

Cemento asfáltico: 5.5%

ESPECIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1192.9	1192.4	1194.2
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	1196	1194.2	1196.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	675.8	675.1	678
Espesor, mm	64.79	65.05	64.71
Estabilidad Marshall	1513.641	1557.641	1559.641
Flujo Marshall (0.25mm)	3.976	3.746	3.756
Temperatura de Ensayo, °C	15.9	15.9	15.9

Cemento asfáltico: 6%

ESPECIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1194.3	1193.5	1193.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	1195.2	1194.4	1195.9
Masa del espécimen sumergido en agua, g	680.2	678.5	680.9
Espesor, mm	64.25	64.26	64.6
Estabilidad Marshall	1469.599	1513.599	1515.599
Flujo Marshall (0.25mm)	4.123	3.893	3.903
Temperatura de Ensayo, °C	16.1	16.1	16.1

Cemento asfáltico: 6.5%

ESPECIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1191.7	1194.5	1193.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	1192.3	1195	1194
Masa del espécimen sumergido en agua, g	679.6	681.2	681.8
Espesor, mm	63.96	64.29	63.91
Estabilidad Marshall	1362.12	1406.12	1408.12
Flujo Marshall (0.25mm)	4.59	4.36	4.37
Temperatura de Ensayo, °C	16.1	16.2	16.2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

Cemento asfáltico: 6.1%

ESPECIMEN N°	1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	1195.6	1196.8	1196.3
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	1196.8	1197.6	1198.1
Masa del espécimen sumergido en agua, g	682.2	683.3	683.2
Espesor, mm	64.4	64.19	65.21
Estabilidad Marshall	1473.67	1739.47	1467.456
Flujo Marshall (0.25mm)	3.991	4.418	4.101
Temperatura de Ensayo, °C	15.3	15.3	15.3

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 6: Peso específico máximo teórico RICE de mezcla asfáltica convencional



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA
 PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA
 MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS

REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO

Peso específico máximo teórico (Rice) ASTM D2041 / MTC E508

Cemento asfáltico: 5%

Especimen N°			1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1501
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8316
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.506

Cemento asfáltico: 5.5%

Especimen N°			2
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8310
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.486

Cemento asfáltico: 6%

Especimen N°			3
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1500
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8295
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.423

Cemento asfáltico: 6.5%

Especimen N°			1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8287
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.395



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

Cemento asfáltico: 6.1%

	Especimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8294
5	Gravedad específica máxima, Gmm	$A/(A+D-E)$	2.422

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 7: Estabilidad y Flujo Marshall de mezcla asfáltica con PET



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA
PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS
REPORT DE ENSAYO DE LABORATORIO
 Estabilidad y flujo Marshall ASTM D6927 / MTC E504

PET 2%

ESPECIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.9	1194.7	1195.1
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	B	1197.5	1196.4	1197.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	677.8	677.6	679.8
Espesor, mm		64.64	64.86	64.86
Estabilidad Marshall		1428.804	1636.916	1468.068
Flujo Marshall (0.25mm)		4.286	4.237	3.851
Temperatura de Ensayo, °C		15.3	15.3	15.3

PET 4.0%

ESPECIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.1	1195.5	1195.3
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	B	1196.7	1198.1	1197.1
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	680.6	680.1	678.8
Espesor, mm		64.59	65.25	64.89
Estabilidad Marshall		1673.912	1720.315	1646.523
Flujo Marshall (0.25mm)		4.009	5.049	4.537
Temperatura de Ensayo, °C		15.4	15.4	15.4

PET 6%

ESPECIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1194.8	1195.7	1195.5
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	B	1197.6	1198.2	1198.4
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	678.4	670.6	674.1
Espesor, mm		64.44	66.16	65.09
Estabilidad Marshall		1672.031	1518.625	1465.15
Flujo Marshall (0.25mm)		4.604	4.683	4.451
Temperatura de Ensayo, °C		15.7	15.7	15.7

PET 8.0%

ESPECIMEN N°		1	2	3
Masa del espécimen seco en el aire, g	A	1195.7	1195.9	1196.7
Masa del espécimen saturado superficialmente seco	B	1198.7	1198.9	1199.7
Masa del espécimen sumergido en agua, g	C	670.8	672	669.3
Espesor, mm		66.23	65.86	66.46
Estabilidad Marshall		1361.034	1530.599	1394.567
Flujo Marshall (0.25mm)		4.186	4.388	4.611
Temperatura de Ensayo, °C		16.1	15.7	15.7

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero

Anexo 8: Peso específico máximo teórico RICE de mezcla asfáltica con PET



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

TESISTA : BSc. ALONSO JOAQUIN LOPEZ MEDINA
 PROYECTO : DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON LA INCORPORACIÓN DE PET PARA
 MEJORAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN VÍAS COLECTORAS URBANAS

REPORTE DE ENSAYO DE LABORATORIO

Peso específico máximo teórico (Rice) ASTM D2041 / MTC E508

PET 2%

	Especimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1499
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8294
5	Gravedad específica máxima, Gmm	A/(A+D-E)	2.422

PET 4.0%

	Especimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1501
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8301
5	Gravedad específica máxima, Gmm	A/(A+D-E)	2.445

PET 6%

	Especimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1500
0	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8306
5	Gravedad específica máxima, Gmm	A/(A+D-E)	2.467

PET 8.0%

	Especimen N°		1
1	Masa de la muestra seca en aire	A	1500
2	Temperatura del agua, °C		25
3	Masa del recipiente con tapa y agua a 25°C, g	D	7414
4	Masa del recipiente con tapa, muestra y agua a 25°C	E	8307
5	Gravedad específica máxima, Gmm	A/(A+D-E)	2.471

MSc. Ing. Fanny Beatriz Eto Chero